



Caracterização das propriedades mecânicas e durabilidade biológica da madeira de *Quercus faginea*

Sofia Isabel Nunes Ramos

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Florestal e dos Recursos Naturais

Orientador: Doutora Helena Margarida Nunes Pereira

Co-orientador: Engenheira Sofia Knapic de Soares Ferreira

Júri:

Presidente - Doutora Maria de Fátima Cerveira Tavares, Professora Auxiliar do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa.

Vogais - Doutora Helena Margarida Nunes Pereira, Professora Catedrática do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa;

- Doutor José Maria Santos Rodrigues Saporiti Machado, Investigador Auxiliar do Laboratório Nacional de Engenharia Civil;
- Licenciada Sofia Knapic de Soares Ferreira, na qualidade de especialista.

Lisboa, 2009

Árvore que os romanos consagraram a Júpiter, e de cuja folhagem se teceram as coroas dos heróis, árvore que ainda na Idade média era objecto de culto – O CARVALHO – como os monumentos, as crenças, as religiões, sofreu no decorrer dos séculos os duros acasos do tempo e da fortuna.

J. Vieira Natividade

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer ao LNEC, sobretudo aos colaboradores do Núcleo de Estruturas de Madeira, sem os quais não teria sido possível a realização deste trabalho. Ao Engenheiro José Saporiti Machado e à Doutora Lina Nunes, um agradecimento muito especial, por tudo! Ao Eng^o António Silva e à Eng^a Sofia Simões, um muito obrigado pela ajuda junto das máquinas de ensaio e pela companhia nas horas intermináveis a lixar madeira. À Sónia Duarte, sem ela ainda estaria a contar térmitas. E ainda um obrigado ao Sr. Arménio e seus colaboradores pelo corte de todos os provetes.

Quero fazer um agradecimento muito especial às minhas orientadoras Doutora Helena Pereira e à Eng^a Sofia Knapic, pela total disponibilidade no esclarecimento das dúvidas que surgiram ao longo do trabalho.

Aos meus colegas de Engenharia Florestal, sobretudo aos que comigo terminam o curso (Andreia Silva, Alzira Ramos, Isabel Rosa, Alexandra Ricardo, Ricardo Monteiro, Joana Melo, Rita Moreira, Marta Salgado, Tiago Dorés, Sónia Cardoso, Henrique Vieira), juntos passamos momentos difíceis e momentos muito bons. Estarão para sempre comigo.

A todas as outras amizades realizadas ao longo dos anos passados no Instituto Superior de Agronomia, para todos um grande beijinho.

A todos os Professores do Departamento de Engenharia Florestal, que me viram chorar e sorrir ao longo do curso. Aos Professores da Secção de Tecnologia dos Produtos Florestais, obrigado por me fazerem acreditar que era capaz e por me mostram como é belo o mundo das madeiras.

À minha maninha, ao meu cunhado, e à minha sobrinha, um muito obrigado, pelo apoio durante todo o curso. Aos meus queridos pais, por todos os sacrifícios passados, um obrigado muito, muito especial. Sem vocês nunca teria chegado aqui!

Ao José Augusto Jordão, um obrigado do tamanho do universo, por todo o amor, carinho, amizade e compreensão ao longo da realização deste trabalho, e por nunca me ter deixado desistir.

A todos os que não foram mencionados e que de alguma forma, contribuíram para a minha chegada a este momento. Muito Obrigado!

Resumo

Apesar de a madeira de carvalho português (*Quercus faginea* L.) ter sido aplicada no passado na construção naval, hoje pouco se utiliza e pouco se conhece, o que requer a sua caracterização e o estudo do seu potencial para uso nobre. Neste trabalho determinaram-se propriedades físico-mecânicas da madeira de carvalho português e avaliou-se a sua resistência ao ataque de térmitas subterrâneas, utilizando metodologias normalizadas. Foram utilizadas dez árvores provenientes de duas regiões de Trás-os-Montes. Os resultados mostraram que a madeira é pesada (870 kg/m^3), tem dureza muito alta no cerne (101 N/mm^2) e apresenta resistência fraca quanto à tensão de ruptura à flexão estática (99 N/mm^2) e média quanto à compressão (47 N/mm^2). Face ao ataque de térmitas subterrâneas, esta madeira é classificada como moderadamente durável. Para avaliar o comportamento em produtos compósitos, produziram-se 30 peças com três espessuras de madeira de carvalho português, coladas a madeira de espruce (*Picea abies* H. Karsten). Os resultados demonstram que a qualidade dos produtos compósitos quanto à sua dureza não é fortemente afectada para as dimensões estudadas.

Palavras-chave: Carvalho português, módulo de elasticidade, tensão de ruptura, dureza, fendimento, durabilidade natural do *Quercus faginea*

Abstract

Although the Portuguese oak wood (*Quercus faginea* L.) has been used in shipbuilding in the past, nowadays it has hardly any use and the knowledge about it is scarce, which requires the characterization and study of its potential for noble use. In this study physical and mechanical properties of Portuguese oak were determined, and the resistance to attack by subterranean termites evaluated, using standard methodologies. Ten trees were used from two regions in Trás-os-Montes. The results showed that this wood is heavy (870 kg/m^3), has a heartwood with a very high hardness (101 N/mm^2), with low bending strength (99 N/mm^2), medium compression strength (47 N/mm^2) and is moderately durable regarding termite attack. To evaluate its behavior in composite products, 30 oak wood pieces with three thicknesses were produced and glued on spruce wood (*Picea abies* H. Karsten). The results showed that hardness of the composites was not very affected for the tested oak wood dimensions.

Keywords: Portuguese oak, mechanical properties, modulus of elasticity, hardness, cleavage, natural durability of *Quercus faginea*

Extended Abstract

In XVII century Portuguese oak wood was used to make ships. But today, this wood has hardly any use, and we don't know very much about its characteristics. However as an oak it is expected to have potential to be used in noble products. This study is part of a research project regarding the wood of two endemic oak, *Quercus suber* and *Quercus faginea*: "OAKWOODS.PT - Properties of wood from Portuguese oaks for high value solid and assembled wood products" (Project PTDC/AGR-AAM/69077/2006), with financial support of FCT (Foundation to Science and Technology) by the program FEDER/POCI 2010.

The material used (ten trees) was collected on natural regeneration populations, from two different regions of Trás-os-Montes (Gralhós -seven trees- and Cortiços -three trees). Wood was cut in boards and dried naturally for six months. Samples were taken according to the specific dimensional requirements of each test. The tests were done in LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) under environment controlled temperature and relative humidity. All the determinations complied with normalized methodologies (European or National). Wood was submitted to static bending, axial compression, cleavage, hardness and natural durability to termites attack.

The results show that this wood is heavy, with a density of 870 kg/m^3 . For 12% humidity, its modulus of elasticity was 8204 N/mm^2 for static bending and 7402 N/mm^2 for axial compression. The resistance to such efforts, shows a low value to bending strength (99 N/mm^2) but a medium value to compression strength (47 N/mm^2). The modulus of elasticity (static bending) of Portuguese oak is lower when compared to other oak woods.

Hardness was determined for heartwood and sapwood. Heartwood has a higher hardness than sapwood, with values of 101 N/mm^2 and 94 N/mm^2 , respectively. This wood has a strong resistance to cleavage.

The termites attack test lasted for two months and allowed to conclude that Portuguese oak wood is moderately durable, like other oak woods.

The potential to make high value solid and assembled wood products was evaluated using 30 oak wood pieces with three thickness, glued on spruce wood (*Picea abies* H. Karsten) that were tested for hardness. The results revealed that hardness of the products is not very affected for the tested oak wood thicknesses.

Portuguese oak has a high hardness and can be used for flooring, For economical reasons it is recommended to make assembled products.

Índice

Agradecimentos.....	III
Resumo.....	IV
Abstract.....	V
Extended abstract.....	VI
Índice.....	VII
Lista de Figuras.....	IX
Lista de Quadros.....	XI
1. Introdução.....	1
2. Revisão bibliográfica.....	2
2.1. Descrição da espécie.....	2
2.1.1. Distribuição geográfica da espécie.....	4
2.1.2. Madeira de <i>Quercus faginea</i>	5
2.2. Caracterização da madeira.....	5
2.2.1. Composição química da madeira.....	7
2.2.2. Propriedades físico-mecânicas da madeira.....	7
2.2.3. Factores que influenciam as propriedades mecânicas da madeira.....	12
2.2.4. Durabilidade natural da madeira.....	14
3. Material e Métodos.....	15
3.1. Material.....	15
3.2. Métodos.....	16
3.2.1. Amostragem.....	16
3.2.2. Ensaio de caracterização mecânica.....	16
3.2.2.1. Flexão estática.....	17
3.2.2.2. Compressão axial.....	19
3.2.2.3. Fendimento.....	21
3.2.3. Ensaio de dureza.....	22
3.2.4. Determinações complementares aos ensaios.....	24
3.2.5. Ensaio de durabilidade.....	25
3.2.6. Utilização da madeira de <i>Quercus faginea</i> como revestimento de superfícies.....	27
3.2.7. Análise estatística.....	27

4. Resultados.....	28
4.1. Massa volúmica.....	28
4.2. Módulo de elasticidade.....	29
4.3. Determinação da tensão de ruptura.....	30
4.4. Força unitária de ruptura por fendimento.....	33
4.5. Durabilidade ao ataque de térmitas subterrâneas.....	34
4.6. Dureza.....	35
4.7. Dureza de peças de revestimento de superfícies.....	38
5. Discussão.....	41
6. Considerações finais.....	45
7. Bibliografia.....	46

Anexos

Lista de figuras

Figura 1. Hábito, casca, glande, folhas vernais e estivais (Oliveira <i>et al.</i> , 2001).....	3
Figura 2. Mapa da distribuição de <i>Quercus faginea</i> em Portugal (Capelo & Catry, 2007).....	4
Figura 3. Ensaio de flexão estática.....	9
Figura 4. Ensaio de dureza	10
Figura 5. Ensaio de compressão axial.....	11
Figura 6. Ensaio de fendimento.....	12
Figura 7. Exemplo das tábuas recebidas para a realização dos ensaios mecânicos	16
Figura 8. Máquina de ensaios universal SHIMADZU AG-250KNIS-MO (a) com pormenor de um ensaio de flexão estática (b).....	17
Figura 9. Relação da carga aplicada no ensaio de flexão estática com a deformação provocada	18
Figura 10. Zona elástica referente ao gráfico anterior, à qual foi ajustada a recta de regressão	18
Figura 11. Máquina de ensaios universal SHIMADZU AG-250KNIS-MO com acessórios para compressão (a) e pormenor de um ensaio de compressão axial (b).....	19
Figura 12. Ensaio de fendimento (a) e exemplo de um provete antes do ensaio (b).....	21
Figura 13. Máquina de ensaios universal AMSLER (a) com pormenores do ensaio de dureza com esfera de 11 mm (b) e com esfera de 10 mm (c).	22
Figura 14. Medição dos diâmetros cruzados das mossas	23
Figura 15. Esquema da montagem dos ensaios de durabilidade (Fonte: EN 118).....	25
Figura 16. Térmitas utilizadas nos ensaios (a) e ensaios já montados (b)	26
Figura 17. Ensaio de dureza (a) e pormenor de algumas peças de soalho de Carvalho-português (b).....	27
Figura 18. Histograma referente às massas volúmicas determinadas para os provetes de caracterização mecânica.....	28
Figura 19. Correlação entre o módulo de elasticidade à flexão estática e a massa volúmica.	30
Figura 20. Correlação entre o módulo de elasticidade à compressão e a massa volúmica. .30	
Figura 21. Correlação da tensão de ruptura à compressão axial com a massa volúmica.	31
Figura 22. Correlação da tensão de ruptura à flexão estática com a massa volúmica.	31
Figura 23. Correlação entre a tensão de ruptura e o módulo de elasticidade determinado por compressão axial.	32
Figura 24. Correlação entre a tensão de ruptura e o módulo de elasticidade determinados por flexão estática.	32
Figura 25. Histograma referente às forças unitárias de ruptura por fendimento.....	33

Figura 26. Correlação entre os valores de força unitária de ruptura por fendimento e a massa volúmica dos provetes.....	33
Figura 27. Histograma referente à dureza determinada com a esfera de 11 mm em cerne. .	36
Figura 28. Histograma referente à dureza determinada com a esfera de 10 mm em cerne. .	36
Figura 29. Histograma referente à determinação da Dureza do borne com esfera de 11 mm.	36
Figura 30. Histograma referente à determinação da Dureza do borne com esfera de 10 mm.	36
Figura 31. Histograma referente à dureza de Brinell determinada em provetes de cerne com 25 mm de espessura.	37
Figura 32. Histograma referente à dureza de Brinell determinada em provetes de borne com 25 mm de espessura.	37
Figura 33. Histograma referente ao ensaio de dureza em soalho com 2mm de espessura de carvalho.	38
Figura 34. Histograma referente ao ensaio de dureza em soalho com 3mm de espessura de carvalho.	39
Figura 35. Histograma referente ao ensaio de dureza em soalho com 5 mm de espessura de carvalho.	39

Lista de Quadros

Quadro 1. Escala para avaliação visual do ataque de térmitas, segundo a norma europeia EN 118.	26
Quadro 2. Classes de durabilidade natural da madeira ao ataque de térmitas (Fonte: EN 350-1).....	26
Quadro 3. Comparação das massas volúmicas (kg/m^3) obtidas para os provetes ensaiados à flexão estática e à compressão axial para os dois locais de proveniência e as duas posições radiais dos provetes.	28
Quadro 4. Módulos de elasticidade à compressão axial em N/mm^2 para a madeira de <i>Quercus faginea</i> de duas proveniências e com provetes retirados em duas posições radiais	29
Quadro 5. Módulos de elasticidade à compressão axial em N/mm^2 para a madeira de <i>Quercus faginea</i> de duas proveniências e com provetes retirados em duas posições radiais	29
Quadro 6. Tensões de ruptura à compressão, em N/mm^2 para a madeira de <i>Quercus faginea</i> de duas proveniências e com provetes retirados em duas posições radiais	30
Quadro 7. Tensões de ruptura à flexão estática, em N/mm^2 para a madeira de <i>Quercus faginea</i> de duas proveniências e com provetes retirados em duas posições radiais	30
Quadro 8. Forças unitárias de ruptura por fendimento, em N/mm para a madeira de <i>Quercus faginea</i> de duas proveniências e com provetes retirados em duas posições radiais	33
Quadro 9. Resultados do ensaio à durabilidade natural da madeira de <i>Quercus faginea</i> Lam	34
Quadro 10. Dureza determinada com esferas de diferente diâmetro para borne e para cerne, em N/mm^2 para a madeira de <i>Quercus faginea</i> de duas proveniências e com provetes retirados do cerne e do borne.....	35
Quadro 11. Comparação dos valores de dureza (HB), em N/mm^2 , obtidos para borne e cerne com o ensaio de dureza superficial, para provetes com 25 mm de espessura	37
Quadro 12. Comparação dos resultados obtidos para dureza dos provetes de soalho com 2, 3 e com 5 mm de espessura de carvalho-português	38
Quadro 13. Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de <i>Quercus faginea</i> Lam.	41
Quadro 14. Comparação da dureza da madeira de <i>Quercus faginea</i> Lam. para provetes com várias espessuras	44

1. INTRODUÇÃO

O género *Quercus* inclui cerca de 450 espécies, sendo considerado um género economicamente importante (Carvalho 1998). Em Portugal contam-se oito espécies autóctones (*Quercus suber* L., *Quercus rotundifolia* Lam., *Quercus faginea* Lam., *Quercus robur* L., *Quercus pyrenaica* Willd., *Quercus lusitanica* Lam., *Quercus coccifera* L., *Quercus canariensis* Willd.), e algumas exóticas, das quais a mais utilizada é *Quercus rubra* L., mais conhecida por carvalho americano.

Portugal é considerado um país florestal, sendo 3412,3 mil ha do território cobertos por floresta. As espécies que ocupam maior área são o pinheiro bravo, o eucalipto e o sobreiro, ocupando os outros carvalhos actualmente apenas 3% da área florestal (IFN, 2006).

O presente trabalho insere-se num projecto de investigação em curso que estuda a madeira de dois destes carvalhos endémicos, *Quercus suber* e *Quercus faginea*: “OAKWOODS.PT - Properties of wood from Portuguese oaks for high value solid and assembled wood products” (Projecto PTDC/AGR-AAM/69077/2006), financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia através do programa FEDER/POCI 2010. O objectivo geral do projecto consiste em fortalecer a floresta portuguesa de carvalhos e a indústria florestal de qualidade, esperando que o conhecimento adquirido, no que respeita às propriedades e qualidade tecnológica das madeiras, permita colocar no mercado produtos de madeira de elevado valor.

Este trabalho teve como objectivo a caracterização da madeira de *Quercus faginea*, também conhecido por Carvalho-português. Essa caracterização realizou-se ao nível das propriedades mecânicas, incluindo a determinação do módulo de elasticidade, módulo de tensão de ruptura, força unitária de ruptura determinada pelo ensaio de fendimento e dureza. Os ensaios de dureza formam enriquecidos com a determinação da resistência em produtos compósitos da madeira deste carvalho associada a uma madeira mais branda.

Caracterizou-se também a durabilidade natural da madeira em relação à acção de térmitas subterrâneas, procedendo-se à comparação dos resultados obtidos com madeira de outros carvalhos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Descrição da espécie

De acordo com Ceballos & Ruiz de La Torre (2001), a espécie *Quercus faginea* da família Fagaceae, sub-família Quercoideae, género *Quercus* apresenta na península ibérica três sub-espécies: *Quercus faginea ssp. alpestris*, *Quercus faginea ssp. faginea* e *Quercus faginea ssp. broteroí*. Este carvalho tem como nome vulgar Carvalho-português ou Carvalho-cerquinho (português), Quejigo ou Roble carraqueño (espanhol), Lusitanian oak (inglês) e Chêne du Portugal (francês) (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Quercus>).

É uma espécie de meia-luz, que não tolera o ensombramento e a competição, mas que beneficia com protecção relativamente ao sol no estado juvenil (Correia & Oliveira 2003). Cresce lentamente e não costuma ultrapassar 20 metros de altura. O tronco é muito tortuoso, apesar de ser possível encontrar indivíduos bem conformados em povoamento. Contudo, em solos superficiais ou degradados também é possível encontrar indivíduos com porte arbustivo. A copa é densa e pode atingir 15 metros de diâmetro (Moreira, 2008). Os povoamentos de carvalho-cerquinho – os cercais - variam muito na sua estrutura, de bosques densos a bosques muito abertos, do género de montados. No entanto, estes bosques raramente são povoamentos puros de *Quercus faginea*, encontrando-se muitas vezes povoamentos mistos irregulares, onde esta espécie coexiste sobretudo com sobreiro e azinheira e também com *Quercus pyrenaica* (Ceballos & Ruiz de La Torre, 2001; Knapic, 2007a).

Vários autores referem-se ao carvalho português como uma espécie de transição entre os carvalhos de folha caduca e os carvalhos de folha persistente, pelo que o designam como um carvalho de folhas marcescentes, uma vez que estas caem tardiamente. As folhas são verde-escuras na página superior e mais claras na inferior, tornando-se acastanhadas na queda. Esta espécie apresenta dois tipos de folhas, folhas vernais e folhas estivais, sendo as últimas mais estreitas, como se pode verificar na Figura 1 (Ceballos & Ruiz de La Torre, 2001; Oliveira *et al.*, 2001; Sobral, 1996). O fruto - glande – tem uma forma cilíndrica, sendo inicialmente de cor verde, passando a acastanhada na fase de maturação. Este produto representa um complemento alimentar para o gado na época do Outono, por amadurecer entre Setembro e Outubro (Correia & Oliveira, 2003; Fabião, *et al* 2007; Oliveira *et al*, 2001).

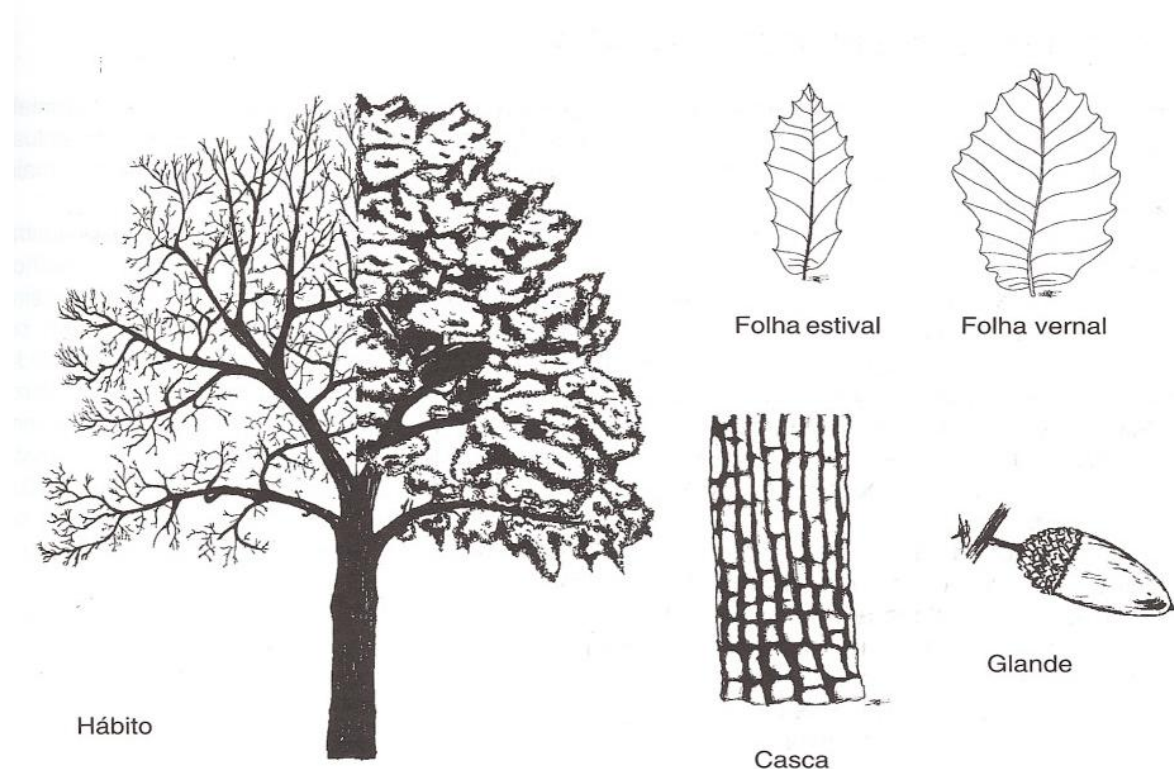


Figura 1. Hábito, casca, glande, folhas vernais e estivais (Oliveira *et al.*, 2001)

De acordo com Albuquerque (1954), o carvalho-português insere-se nas zonas ecológicas MAXAM (Mediterrâneo-atlântica X Atelante-mediterrânea), AM (Atlante-mediterrânea), SM (Submediterrânea), AMxSM (Atlante-mediterrânea X Submediterrânea), bem como algumas zonas submontanas com altitudes 400 e 700 metros.

Esta espécie adapta-se bem a uma grande amplitude térmica, característica dos climas continentais (Ceballos, 2001), suportando temperaturas mínimas de -25°C até máximas de 45°C (Ayanz, 1986 *cit in* Correia & Oliveira, 2003), embora necessite de uma temperatura média anual entre 15°C e 26°C no verão e -4°C e 8°C no Inverno. No que respeita à precipitação, esta espécie ocorre em regiões onde a média anual se situa entre 350 mm e 2000 mm.

Não é muito exigente quanto ao tipo de solos, de modo que é possível encontrar carvalho português em solos ácidos (siliciosos), e em solos neutros ou básicos (calcário).

Esta espécie possui uma grande longevidade, sendo mencionadas na literatura longevidades até 400 anos (Oliveira *et al.*, 2001). Considera-se como idade de revolução, em alto fuste, adequada entre os 100 e os 150 anos (Correia & Oliveira, 2003).

2.1.2. Distribuição geográfica da espécie

Esta espécie é oriunda da Península Ibérica e norte de África (Marrocos, Tunísia e Argélia). Em Espanha ocorre em quase todas as províncias, excepto a noroeste e nas Baleares (Ceballos & Ruiz de La Torre 2001).

Existem três subespécies de carvalho português em diferentes zonas do território nacional (Figura 2). A *Quercus faginea* subsp. *faginea* encontra-se na região transmontana, na bacia do rio Douro, normalmente juntamente com sobreiro. A *Quercus faginea* subsp. *broteroi* encontra-se em grandes extensões nas serras da Arrábida, Sintra, Montejunto, Aire e Candeeiros, encontrando-se ainda na zona de Tomar, Pombal e Leiria. A subespécie *Quercus faginea* subsp. *alpestris* é a menos representada em Portugal, aparecendo apenas no Algarve, sendo no entanto muito abundante no Norte de África.

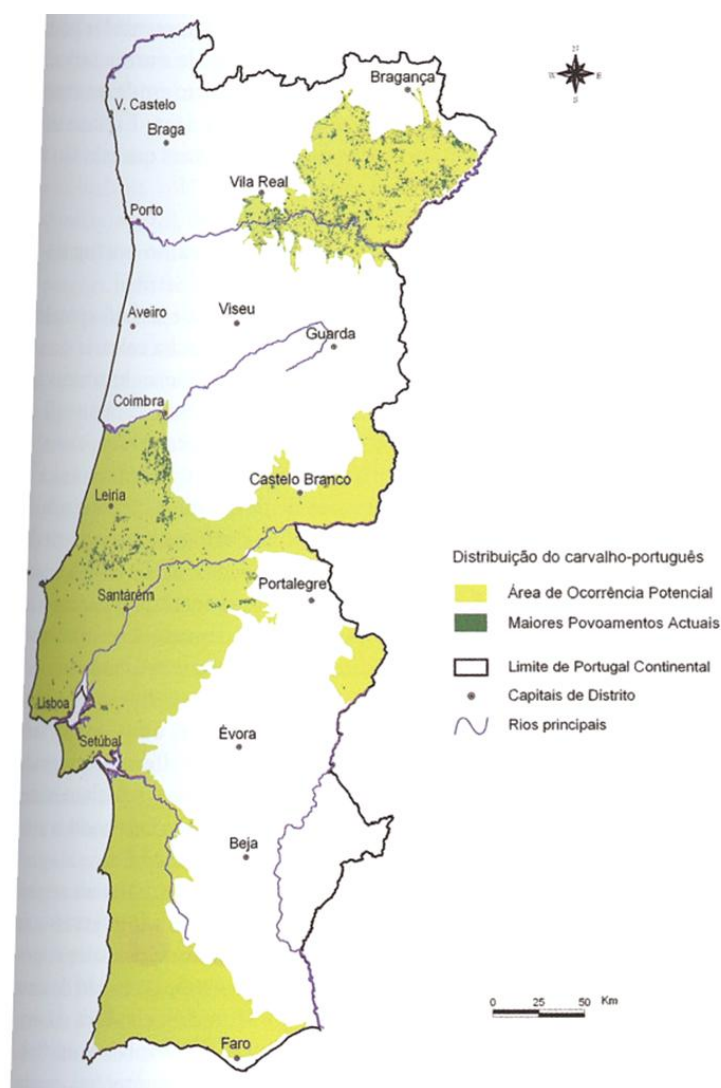


Figura 2. Mapa da distribuição de *Quercus faginea* em Portugal (Capelo & Catry, 2007)

Nos últimos séculos verificou-se uma forte regressão dos cercais, estando na actualidade a existência desta espécie reduzida a pequenos bosquetes. No Figura 2 pode verificar-se a existência de duas manchas, uma maior, colorida de verde-claro, que corresponde à área de ocorrência natural deste carvalho, pois possui condições ecológicas favoráveis, e manchas verde-escuras que correspondem a povoamentos mistos ou puros que foram cartografados na década de 90 (Capelo & Catry, 2007).

2.1.3. A madeira de *Quercus faginea*

Nos séculos XV e XVI, a madeira de *Quercus faginea* foi utilizada na construção de naus e caravelas, o que sugere ser uma madeira de grande potencial.

Em 1929, no seu trabalho de fim de curso, Natividade descreve a madeira de carvalho português como uma madeira muito estimada pelo povo, mais para manter a tradição do que pelas suas qualidades, pois propriedades como a elevada densidade e dureza, aliadas à grande resistência à imersão, já não eram tão apreciadas como outrora. Associa ainda a abertura de fendas em quantidade considerável no cerne e as dimensões reduzidas das peças, à aplicação desta madeira em produtos de baixo valor.

Mais tarde, Goes (1991) contraria estas afirmações, dizendo que a madeira de carvalho português é de boa qualidade, melhor do que a de *Quercus pyrenaica*, com aplicações ao nível da construção civil, carpintaria, mobiliário, tanoaria, travessas de caminho de ferro, combustível, etc.

Segundo Carvalho (1997), esta madeira apresenta uma boa recepção de vernizes e uma colagem satisfatória, características que, aliadas ao facto de ser uma madeira pesada (890 kg/m³), ao bom aspecto estético e à resistência mecânica média à flexão estática e à compressão axial, levam a que tenha um potencial forte para a produção de soalho, painéis, folha de revestimento aplicada em materiais compósitos ou mobiliário. No que respeita à vulnerabilidade da madeira a agentes bióticos, refere que o borne é vulnerável ao ataque de insectos xilófagos, mas que o cerne apenas se torna vulnerável para madeiras muito velhas.

2.2. Caracterização da madeira

A madeira é um material com propriedades excepcionais, que pode ser utilizada para proveito da humanidade, e que tem funções vitais para as árvores, uma vez que suporta a copa e conduz a água e os nutrientes da raiz até às folhas.

A madeira, ou lenho, é produzida por um meristema secundário, o câmbio vascular, que tem a capacidade de se dividir para o interior formando o xilema (lenho) e para o exterior dando

origem ao floema. O câmbio vascular é constituído por dois tipos de células, as fusiformes iniciais e as iniciais radiais. A formação do xilema e do floema processa-se de duas formas – divisão periclinal e divisão anticlinal. O primeiro tipo de divisão dá-se perpendicularmente ao eixo radial da célula, levando ao aumento em volume uma vez que junta uma célula ao xilema e outra ao floema. O segundo tipo de divisão permite a continuidade do câmbio vascular levando ao aumento do diâmetro da árvore (Carvalho, 1996; Leal, 2008).

Existem alguns aspectos da madeira que merecem ser mencionados, pelo que se faz uma pequena referência a cada.

Medula – conjunto de células parenquimatosas que apesar de não ser muito importante, é um factor que pode provocar sérios defeitos de secagem (Melo, 1999) e ter influência na resistência da madeira, sendo preferível obter sempre peças isentas de medula.

Anéis de crescimento – Os anéis de crescimento são tanto mais visíveis quanto mais heterogénea for a madeira (Carvalho, 1996). Um anel é constituído por lenho inicial (Primavera) e por lenho final (Verão). O lenho inicial no caso das resinosas é mais volumoso e possui uma densidade mais baixa, comparado com o lenho final. Relativamente às folhosas, quando a distinção das camadas é possível, em climas temperados, verifica-se que o lenho final é mais desenvolvido do que o lenho inicial (Melo, 1999). Os anéis de crescimento permitem uma reconstrução detalhada do crescimento da árvore, pois reflectem as condições ambientais bem como as alterações ocorridas na estação onde a árvore se encontrava (Spiecker, 2002).

Borne e Cerne – A partir de uma certa idade da árvore, as células da zona central do lenho começam a morrer, formando uma zona fisiologicamente inactiva que se chama cerne. A zona activa designa-se por borne, onde se mantêm vivas as células parenquimatosas. Nas espécies em que se distinguem facilmente as duas zonas, nota-se que a tonalidade do cerne é mais escura, o que se deve à oxidação e polimerização de substâncias fenólicas conduzidas pelos raios levando à formação de pigmentos (Melo 1999). Estas substâncias normalmente designadas por extractivos, conferem ao cerne uma maior durabilidade natural em comparação com o borne (Melo, 1999; Knapic *et al.*, 2006). Pode-se distinguir o borne do cerne não só pela sua tonalidade, mas também pela permeabilidade, que é superior no borne.

Lenho juvenil – Encontra-se junto à medula, sendo resultado dos primeiros anos de actividade cambial, e tem como características a menor densidade, menor resistência mecânica, menor quantidade de lenho de verão, fibras com menor comprimento, menos celulose. Este tipo de lenho vai normalmente até ao 15º anel, dependendo da espécie.

Segundo Zobel (1989), a melhor forma de evitar a presença de lenho juvenil nos produtos de madeira é alterar a idade de corte das árvores, pois ao aumentar a idade de revolução a a proporção de lenho juvenil no tronco é menor.

Lenho de reacção – Este lenho, que pode ser de compressão (nas resinosas) ou de tracção (nas folhosas), influencia as propriedades da madeira tanto positiva como negativamente. O lenho de compressão tem menor módulo de elasticidade (MOE) e menor módulo de tensão de ruptura (MOR) à flexão estática. O lenho de tracção apresenta um baixo MOR á compressão axial, mas um MOR à tracção axial elevado (Tsoumis, 1991;Melo, 1999).

2.2.1. Composição química da madeira

Os principais elementos químicos da madeira são o carbono (49-50%), hidrogénio (6%), oxigénio (44-45%) e azoto (0,1-1%), que dão origem aos três principais compostos orgânicos que compõem quimicamente a madeira: celulose, hemiceluloses e lenhina (Tsoumis, 1991). Estes compostos, estão presentes na madeira em diferentes proporções, sendo o mais abundante a celulose. Assim, de acordo com Tsoumis (1991), a madeira é composta por 40-45% de celulose, 25-35% de lenhina nas resinosas ou 17-25% nas folhosas, 20% de hemiceluloses nas resinosas ou 15-35% nas folhosas. A madeira inclui também alguma quantidade de extractivos, em geral numa proporção baixa, mas que pode atingir os 10%.

Os componentes químicos influenciam as propriedades mecânicas, bem como as propriedades físicas.

2.2.2. Propriedades físico-mecânicas da madeira

A resistência da madeira a forças exteriores depende da força aplicada e da forma como esta é aplicada. Existem três tipos básicos de forças: a tracção e compressão (forças normais) e corte. Quando estamos perante um esforço de tracção, as forças que se encontram a actuar tendem a aumentar o comprimento do corpo, ao passo que no caso de um esforço de compressão, as forças ao actuarem levam a que o corpo em questão se torne mais pequeno (Tsoumis, 1991). No que se refere ao esforço de corte, este ocorre quando sobre o corpo de prova actuam forças de compressão e forças de tracção, em sentidos opostos, o que leva a um deslizamento das fibras.

As propriedades físico-mecânicas apresentam variabilidade, dentro da mesma espécie, entre espécies, entre árvores e até mesmo dentro da mesma árvore (Zobel, 1989). A variabilidade ocorre devido a diversos factores, podendo ser detectada para a maioria das espécies um padrão de variação horizontal (da medula para a casca) ou vertical (da base

para o topo) (Machado & Cruz 2005). Tendo em conta a variabilidade natural da madeira, e para que seja possível comparar madeiras e proceder a uma caracterização fidedigna, todos os ensaios que se realizem devem obedecer a certos critérios, os quais levaram à criação de metodologias normalizadas. De modo a diminuir o erro provocado pela variabilidade natural é aconselhável utilizar um grande número de amostras.

Carvalho (1996) refere quatro pressupostos a ter em conta na realização de ensaios de caracterização mecânica:

1. Os provetes a ensaiar não devem apresentar defeitos de cariz natural (nós, inclinação do fio, lenho de reacção), defeitos de secagem ou mesmo de laboração.
2. Os provetes devem ter um formato paralelepípedo, onde as três faces (radial, tangencial e transversal) estejam representadas, de modo que a aplicação da força seja em face homóloga.
3. As peças a ensaiar devem ter o mesmo teor de água, sendo considerado o valor de 12%.
4. Os ensaios devem ser realizados em condições ambientais padronizadas, que segundo as normas portuguesas correspondem a $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura e $65\% \pm 5\%$ de humidade relativa do ar.

A aplicação de forças externas nos materiais leva à criação de tensões internas que levam por sua vez à deformação do corpo, alterando as suas dimensões. Assim a resistência da madeira é determinada pela tensão máxima até à ruptura aplicada em corpos isentos de defeitos.

Flexão Estática

O ensaio de flexão estática consiste na aplicação de carga a meio-vão de uma peça simplesmente apoiada nas extremidades, sendo a carga introduzida a uma velocidade constante (Figura 3). Num ensaio de flexão estática, o provete está sujeito à acção de todos os três tipos de forças, tracção, compressão e corte, acabando a ruptura por ocorrer por tracção.

Este ensaio fornece informação muito útil no que respeita ao cálculo de estruturas, pois com ele é possível a determinação do módulo de elasticidade (MOE). O módulo de elasticidade mede a rigidez da madeira, característica mecânica muito importante em produtos de uso estrutural, já que tem um impacto directo na deformabilidade da estrutura (Ivkovic *et al.*, 2009). De acordo com Carvalho (1996), a deflexão de uma viga varia inversamente com o

MOE, ou seja, quanto menor o módulo de elasticidade maior a deflexão, para elementos de igual secção transversal. Quando comparado com o módulo de elasticidade de outros materiais, a madeira possui valores muito inferiores, embora se tivermos em conta a sua densidade, esta se compare ao aço (Tsoumis, 1991).



Figura 3. Ensaio de flexão estática

Dureza

A dureza consiste na capacidade de um corpo resistir à deformação localizada. Num típico teste de dureza, uma ferramenta com uma geometria conhecida é forçada a penetrar no material (Figura 4). A dureza é definida pela razão da força aplicada com o tamanho da indentação (Doyle & Walker, 1984). Segundo Tsoumis (1991), esta propriedade está relacionada com a facilidade ou dificuldade de trabalhar uma madeira. É muito importante para certos usos da madeira, como é exemplo o uso de madeira para pavimentos e materiais desportivos. Existem madeiras classificadas quanto à sua dureza desde brandas (pinheiro, choupo) a duras (faia, oliveira, carvalho). Quando comparada com outros materiais, a madeira é considerada branda (Vignote & Peris, 2000).).

A dureza pode ser determinada de duas formas. A dureza de Brinell define-se como o rácio entre a força aplicada pela área superficial de contacto, enquanto a dureza de Meyer corresponde ao rácio da força aplicada pela área de contacto projectada (considerada πr^2 quando metade de uma esfera é obrigada a penetrar no material). A dureza de Janka consiste em fazer penetrar na madeira metade do diâmetro de uma esfera, sendo o resultado apresentado como a dureza de Meyer (kg/cm^2). Os métodos de determinação da dureza diferenciam-se uns dos outros pelo tipo de ferramenta utilizada. Assim, existem métodos que utilizam esferas (os já referidos), cilindros, cones e cunhas (Doyle & Walker, 1984).

Os vários métodos de determinação da dureza apresentam desvantagens e vantagens. O método de Brinell tem como principal problema a medição da moosa residual, enquanto o método de Janka provoca danos irreversíveis no corpo de prova, com uma indentação profunda. O primeiro método apresenta uma moosa superficial, sendo mais apropriada para madeiras mais densas do que o método de Janka. No caso do segundo método, as indentações apresentam sempre a mesma profundidade, não havendo necessidade da medição da indentação (Doyle & Walker, 1984).

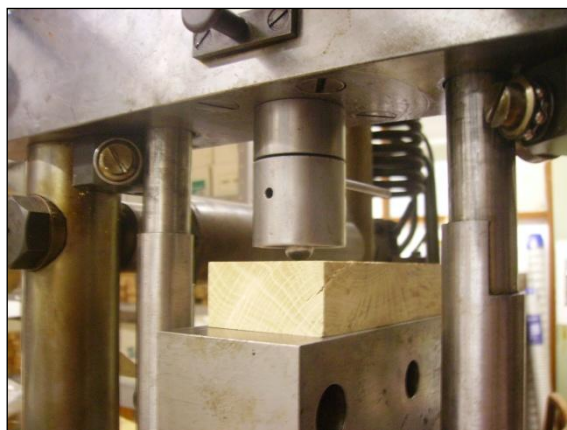


Figura 4. Ensaio de dureza

Ambos os métodos apresentados podem ser utilizados em madeira, sendo o mais frequente o método da dureza de Janka, uma vez que o método da dureza de Brinell é mais utilizado na determinação da dureza de materiais sintéticos e de metais (Bektas *et al.*, 2001). Um estudo realizado em madeira de faia por Bektas *et al.* (2001) determinou que é possível passar da dureza de Janka para a dureza de Brinell, e vice-versa. Dumail *et al.* (1998) encontraram uma relação entre ambas as durezas para a madeira de pinheiro bravo.

Doyle & Walker (1985) referem a densidade como a característica que mais influencia a dureza das madeiras, após um estudo efectuado em madeiras com densidades entre 141 e 1274 kg/m³.

Compressão

A resistência da madeira à compressão (Figura 5) varia consoante a direcção em que a força é aplicada - paralela ou perpendicularmente ao fio -, sendo no primeiro caso mais elevada até cerca de 15 vezes quando comparada com a compressão transversal. A madeira é menos resistente a esforços de compressão axial do que os metais, mas é mais resistente que outros materiais de construção, como o tijolo e a pedra. Segundo Tsoumis (1999), nas resinosas a resistência à compressão no plano tangencial é superior que no plano radial, acontecendo o contrário nas folhosas. A ruptura da madeira quando sujeita a

um esforço de compressão axial deve-se à ruptura das camadas intercelulares, fendimento, dobragem das células e ruptura das paredes celulares.



Figura 5. Ensaio de compressão axial

Este ensaio é fortemente influenciado pelo teor de água, sendo que com o aumento do teor de água da madeira, a resistência à compressão diminui. Contudo esta relação só é válida até ao ponto de saturação das fibras (PSF), a partir do qual a resistência se mantém constante (Gutierrez & Plaza, 1967).

Tracção

Também no caso da resistência à tracção, é importante a carga ser aplicada axialmente ou transversalmente. A madeira é mais resistente à tracção axial, podendo essa resistência atingir 300 N/mm^2 em madeiras tropicais. As cadeias de celulose possuem teoricamente uma resistência à compressão axial de aproximadamente 7500 N/mm^2 .

A resistência à tracção é muito influenciada pela presença de nós, fio espiralado, bem como outros defeitos. Os materiais só são sujeitos a tensões de tracção axial em situações muito pontuais como por exemplo em hélices propulsoras de aviões pequenos, e também nas linhas das asnas. No caso de estruturas, a exposição dos materiais a tensões de tracção transversal são de evitar, uma vez que a resistência da madeira a este tipo de esforço é muito pequena, podendo ser nula na presença de certo tipo de defeitos (Tsoumis, 1991).

Fendimento

A resistência ao fendimento é determinada pela coesão que a madeira é capaz de suportar quando aplicada uma força que leva ao rasgamento do material (Carvalho 1996). A madeira apresenta uma resistência axial baixa ao fendimento, o que se apresenta como uma vantagem por exemplo quando se racha lenha para combustível. No entanto é uma desvantagem no caso de peças de madeira que fendem ao serem aparafusadas ou

pregadas. A resistência ao fendimento varia consoante a espécie, sendo as madeiras de resinosas menos resistentes quando comparadas com as madeiras de folhosas (Tsoumis, 1991).

Este ensaio é muito semelhante ao ensaio de tracção transversal, sendo o provete a ensaiar muito semelhante (Figura 6).



Figura 6. Ensaio de fendimento

2.2.3. Factores que influenciam as propriedades mecânicas da madeira

A madeira é um material heterogéneo nas suas propriedades, já que apresenta resistências diferentes consoante o plano que está sujeito ao esforço, e por isso é considerado um material anisotrópico. Além deste facto existem ainda vários factores que estão na origem da variação das propriedades mecânicas, por exemplo o teor de água, a densidade, a velocidade da aplicação da carga, a duração da carga, defeitos intrínsecos à madeira (fendas, nós, inclinação do fio), lenho juvenil e mesmo a temperatura.

A higroscopicidade é uma característica importante da madeira, sendo uma desvantagem do ponto de vista de uso em que a estabilidade dimensional é importante. Esta característica consiste na capacidade que a madeira tem de captar água presente na atmosfera, e de libertar água presente na sua estrutura, de modo a atingir o teor de humidade de equilíbrio com a atmosfera (Tsoumis, 1991; Melo, 1999). O teor de água afecta todas as propriedades físicas e mecânicas da madeira, pelo que tem sido alvo de vários estudos, por exemplo por Wang (1999), Heräjärvi (2004) e Haseilein (2002). Em geral, as propriedades mecânicas variam inversamente com a variação do teor de água da madeira abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF). Tsoumis (1991) e Wang & Wang (1999) referem variações

médias para uma variação de 1% do teor de água, do MOR, MOE, MOR à compressão axial e dureza de 4%, 2%, 6%, 2,5%, respectivamente. Também Haseilein (2002), em madeira de *Eucalyptus saligna* afirma que o MOR varia mais do que o MOE em ensaios de flexão estática.

A massa volúmica ou densidade é o melhor e mais simples indicador da resistência da madeira sem defeitos (Tsoumis, 1991). Esta característica é considerada uma das mais importantes características da madeira, já que tem uma boa correlação com a maioria das propriedades físico-mecânicas e com a performance em uso (Knapic *et al.*, 2007b). Alterações nesta característica levam à variação de outras propriedades, de acordo com Haseilein (2002) e Wang & Wang (1999). Sendo a massa volúmica a medida da quantidade de matéria presente em determinado volume de madeira, está subentendido que também os extractivos (compostos orgânicos e inorgânicos, passíveis de serem removidos por solventes, como é o caso da água), têm influência sobre as propriedades mecânicas como referido por Hernandez (2007). Tal facto foi verificado por Grabner *et al.* (2005) num estudo em madeira de *Larix*, onde ensaiaram provetes com extractivos e provetes sem extractivos, concluindo que existe uma certa relação entre os extractivos presentes na madeira e as propriedades mecânicas.

A presença de lenho juvenil é também fonte de variabilidade na madeira. Machado & Cruz (2005), num estudo com pinheiro bravo verificaram uma forte influência do lenho juvenil (madeira a 10% de distância da medula), nas propriedades mecânicas, levando à diminuição destas. As propriedades mecânicas apresentam uma variação positiva da medula para a casca. Ballarin & Nogueira (2005) referem que apesar de se verificar mais em madeira de resinosas do que nas folhosas, as características do lenho juvenil diferem das do lenho adulta (junto à casca), verificando-se que o MOE da resistência à compressão e à flexão estática são muito afectadas pelo lenho juvenil.

Tsoumis (1991) menciona que o aumento da temperatura reduz a resistência da madeira, mas temperaturas inferiores a 20°C aumentam o MOE e vice-versa. O aumento da temperatura quando associado a um teor de água elevado leva à redução do módulo de elasticidade. Contudo, se o teor de água for acima do ponto de saturação das fibras e a temperatura for inferior a zero, o módulo de elasticidade aumenta, uma vez que ocorre um aumento da rigidez da madeira provocado pelo congelamento da água no interior do lúmens das células. Korkut *et al.* (2007) referem a redução do MOR determinado por flexão estática e por compressão axial, MOE, dureza de Janka, resistência à tracção e resistência à flexão dinâmica, mas dizem que a estabilidade dimensional e a durabilidade da madeira aumentam com tratamentos térmicos.

Os defeitos da madeira reduzem as propriedades mecânicas, sendo a sua influência dependente do tipo, tamanho e posição do defeito. Os defeitos que mais influenciam são os nós, as fendas, a inclinação do fio e o lenho de reacção.

2.2.4. Durabilidade natural da madeira

Todas as espécies de madeira, mesmo as de reconhecida durabilidade natural, são incapazes de resistir indefinidamente às variações das condições ambientais, ao ataque de determinados organismos e mesmo à acção do próprio homem (Oliveira *et al.*, 2005). A durabilidade natural segundo a norma portuguesa de terminologia (NP 3928), é a durabilidade apresentada pela madeira exclusivamente em resultado das substâncias tóxicas ou inibidoras naturais nela contidas. Como material orgânico que é, a madeira está sujeita ao ataque de certos organismos, como fungos, bactérias e alguns insectos xilófagos, como é o caso das térmitas (Faherty & Williamson, 1995). São os ataques dos insectos que podem causar os piores danos na madeira, segundo Vignote & Peris (2000).

Em relação às térmitas, também conhecidas por formigas brancas, estes insectos da ordem Isoptera encontram-se praticamente em todo o mundo, com excepção das regiões ártica e antárctica. Estima-se que existam mais de 5000 espécies de térmitas (Kollmann & Côté, 1968). A espécie com maior distribuição e que causa mais destruição em Portugal é a *Reticulitermes grassei* (Clément) (Nobre & Nunes 2001). Estes insectos causam estragos em construções, mais propriamente em vigamentos, pavimentos e rodapés, sobretudo nos pisos térreos. Encontram-se térmitas normalmente em material lenhoso existente no solo, tal como cepos, raízes. As térmitas vivem em sociedade, organizadas por castas, existindo em cada colónia uma rainha, obreiras e soldados. Madeiras utilizadas a nível nacional na construção como é o caso do pinheiro bravo, são madeiras susceptíveis ao ataque de térmitas. Os estragos causados não são observáveis em fase inicial, pelo que quando se detecta a presença de térmitas na madeira o estrago já é bastante considerável. Assim, ao escolher uma madeira para utilização em pavimentos, guarnições de vãos, escadas e lambris, deverá ter-se em conta a durabilidade natural. No caso de uma madeira com baixa durabilidade natural é prudente proceder-se a um tratamento preservador (LNEC, 1999).

Alguns estudos realizados, como por exemplo Taylor *et al.* (2006) e Trevisan *et al.* (2003), estudaram a resistência de certas madeiras ao ataque de térmitas. Taylor *et al.* (2006), ao submeterem amostras de cerne da madeira de *Thuja* e de *Chamaecyparis* ao ataque de térmitas, em laboratório, concluíram que a resistência está relacionada com os extractivos presentes, uma vez que a extracção alguns desses extractivos com metanol levou a uma diminuição da resistência ao ataque das térmitas.

3. Material e Métodos

3.1. Material

Foram abatidas dez árvores de *Quercus faginea* em dois locais do Nordeste Transmontano, em povoamentos puros de regeneração natural, com idades a variar entre os 34 e os 60 anos. As árvores provieram de Cortiços, em Macedo de Cavaleiros (41°30'41"N; 07°01'06"W) e de Gralhós em Izeda (41°32'10"N; 06°46'25"W).

A parcela de amostragem de Cortiços pertence à unidade cartográfica Idox 16.1, tendo Leptossolos Dístricos Órticos de xisto (Idox) como principal unidade de solo associados a Leptossolos Dístricos Órticos de granitos. Estes são solos ácidos, com rocha dura a menos de 50 cm de profundidade. Esta parcela, do ponto de vista climático, encontra-se numa zona de transição (T4) entre a Terra Fria do Planalto Transmontano e a Terra Quente, com temperatura média anual entre 12°C e 14°C e a precipitação média anual entre 600 a 800 mm.

A parcela de amostragem de Gralhós pertence à unidade cartográfica leob 1.4, com Leptossolos Eutricos Órticos, derivados de rochas básicas. Estes solos são pouco ácidos ou neutros, tendo rocha consolidada a menos de 50 cm de profundidade. Esta parcela do ponto de vista climático encontra-se na zona da Terra Quente (Q4), onde a temperatura média anual é superior a 14°C com uma precipitação média anual entre 600 a 800 mm.

Em Cortiços, abateram-se três árvores, com alturas entre 9,5 e 11,7 m e um dap (diâmetro à altura do peito \approx 1,30 m) entre 85 e 104 cm. Em Gralhós, abateram-se sete árvores com alturas entre 9,7 e 11,0 m e um dap entre 60 e 90 cm. Em cada árvore foram retiradas rodela com aproximadamente 10 cm de espessura a diferentes alturas para os vários ensaios. Para os ensaios mecânicos retiraram-se de cada árvore dois toros com 55 cm de altura, abaixo do DAP e acima da rodela dos 3,40 m.

3.2. Métodos

3.2.1. Amostragem

Os toros destinados a ensaios mecânicos foram cortados em tábuas na direcção axial. Estas tábuas foram assinaladas com um código composto por três números, sendo o primeiro o número da árvore, seguido do número correspondente à altura no tronco e por fim, o número que identifica a tábua. Após secagem ao ar durante seis meses, marcaram-se nas tábuas os provetes, de modo a aproveitar ao máximo a madeira disponível, evitando as fendas que se formaram no cerne durante a secagem e o elevado número de nós (Figura 7).



Figura 7. Exemplo das tábuas recebidas para a realização dos ensaios mecânicos

Para os ensaios de caracterização mecânica, foram marcados nas tábuas 43 provetes a 10 e 90% de distância à medula com dimensões de 2x2x40 cm, nas direcções radial, transversal e tangencial, respectivamente.

Para os ensaios de caracterização da dureza marcaram-se 29 provetes nas mesmas tábuas de onde foram retirados os provetes para os ensaios de flexão, sendo 13 de cerne e 16 de borne, com 5 cm de largura, 20 cm de comprimento e espessuras variáveis.

Para os ensaios de durabilidade face ao ataque por térmitas foram marcados nas régua provetes com dimensões 5x2x50 cm nas direcções radial, transversal e tangencial, respectivamente, na zona de cerne, que depois foram rectificadas para as dimensões 5x1,5x5 cm. Entre todos os provetes obtidos, escolheram-se 36 provetes (seis provetes de três árvores por proveniência).

3.2.2. Ensaios de caracterização mecânica

Todos os ensaios de caracterização mecânica (flexão estática, compressão axial e fendimento) foram realizados no Núcleo de Estruturas de Madeira do Laboratório Nacional

de Engenharia Civil, em ambiente condicionado com $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura e $65\% \pm 5\%$ de humidade relativa do ar, de acordo com metodologias normalizadas.

3.2.2.1. Flexão estática

O ensaio de flexão estática foi realizado numa máquina de ensaios universal SHIMADZU AG-250KNIS-MO de 250 kN de capacidade (Figura 8.a), segundo as metodologias apresentadas na norma NP 619. Os provetes com dimensões 2X2X40 cm nas direcções radial, transversal e tangencial, são colocados sobre os apoios, orientados de forma que a carga seja aplicada segundo a direcção tangencial da madeira, e tendo em atenção que o eixo da madeira fique perpendicular aos eixos dos apoios e a sua secção média fique centrada de modo a que a distância entre esta e cada apoio seja a mesma. Fez-se descer o prato superior de modo a que o cutelo ficasse em contacto com o provete, sem lhe transmitir força. Depois aplicou-se a carga a velocidade constante, de modo a atingir a ruptura ao fim de 3 minutos. É possível observar um momento deste ensaio na Figura 8.b. A força de ruptura é a força máxima aplicada durante o ensaio.

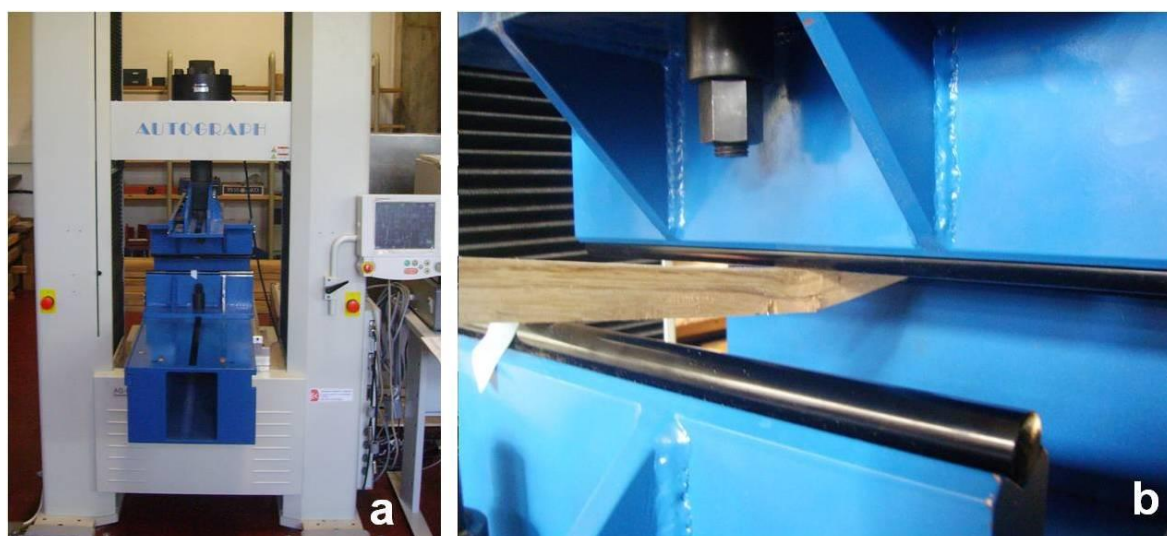


Figura 8. Máquina de ensaios universal SHIMADZU AG-250KNIS-MO (a) com pormenor de um ensaio de flexão estática (b)

Determinação do Módulo de Elasticidade

Para calcular o módulo de elasticidade, recorreu-se a gráficos de Deformação/Carga (Figura 9). Depois de analisado o gráfico e detectada a zona elástica, onde a carga aplicada é directamente proporcional à deformação, desenhou-se um novo gráfico apenas com a carga e as deformações referentes à zona elástica (Figura 10) onde se ajustou uma recta de regressão, da qual se retirou o declive, e se procedeu aos cálculos para a determinação do módulo de elasticidade.

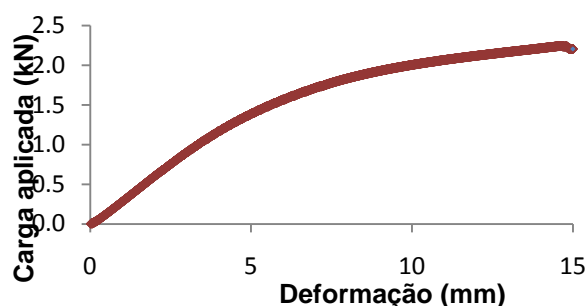


Figura 9. Relação da carga aplicada no ensaio de flexão estática com a deformação provocada

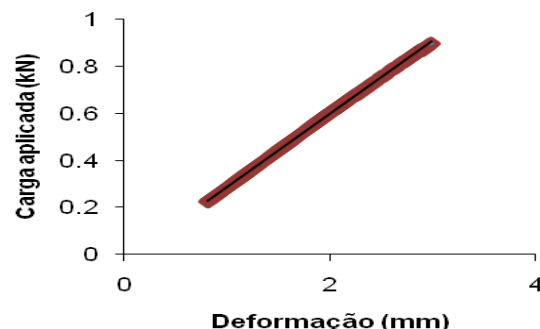


Figura 10. Zona elástica referente ao gráfico anterior, à qual foi ajustada a recta de regressão

Determinado o declive da recta de regressão referente à zona elástica, aplicou-se a fórmula (1), presente na norma EN 408.

$$E_f = \frac{\Delta F}{\Delta l} \times \frac{l^3}{4bh^3} \quad (1)$$

Onde:

E_f – módulo de elasticidade à flexão estática, expresso em N/mm^2

$\frac{\Delta F}{\Delta l}$ - declive da recta de regressão

l – distância entre apoios, expressa em milímetros

b, h – dimensões transversais do provete, expressas em milímetros

Determinação da Tensão de ruptura

Para a determinação da tensão de ruptura determinada por flexão estática, utilizou-se a equação (2), apresentada na norma ISO 3133.

$$\sigma_{fH} = \frac{3F_{máx}l}{2bh^2} \quad (2)$$

onde:

σ_{fH} – tensão de ruptura à flexão estática, no momento do ensaio, expressa em N/mm^2

$F_{máx}$ – força de ruptura, expressa em newtons

l – distância entre apoios, expressa em milímetros

b, h - dimensões transversais do provete, expressas em milímetros

O valor determinado encontra-se a um teor de água H , de modo que é necessário corrigir o teor de água para 12%. Tal efectuou-se com a fórmula (3), apresentada na norma NP 619.

$$\sigma_{12} = \sigma_{fH} [1 + k(H - 12)] \quad (3)$$

Onde:

σ_{12} – tensão de ruptura a 12% de teor de água, expressa em N/mm²

σ_{fH} – tensão de ruptura no momento do ensaio, expressa em N/mm²

k – coeficiente de valor 0,04 para o ensaio de flexão estática

H – teor de água do provete no momento do ensaio, expresso em %

3.2.2.2. Compressão axial

Findo o ensaio de flexão, foi retirado da extremidade de cada provete (sempre que esta não demonstrasse dano mecânico), um outro com as dimensões 2X2X6 cm, para o ensaio de compressão axial. Neste ensaio também foi utilizada a máquina de ensaios universal SHIMADZU AG-250KNIS-MO de 250 kN, com os acessórios próprios que se observam na Figura 11 (a), que consistem em dois pratos, um fixo e outro móvel. Assim, de acordo com a norma NP 618, mediram-se as dimensões transversais do provete, sendo depois centrado sobre o prato inferior da máquina e com o eixo vertical do provete, fazendo-se descer o prato superior de modo a contactar com a face do provete, mas sem ser aplicada força. De seguida, a força foi aplicada a uma velocidade constante, para atingir a ruptura em 3 minutos. A força de ruptura corresponde à força máxima aplicada durante o ensaio. Neste ensaio foi utilizado um extensómetro de modo a medir a deformação provocada no provete (Figura 11 b).

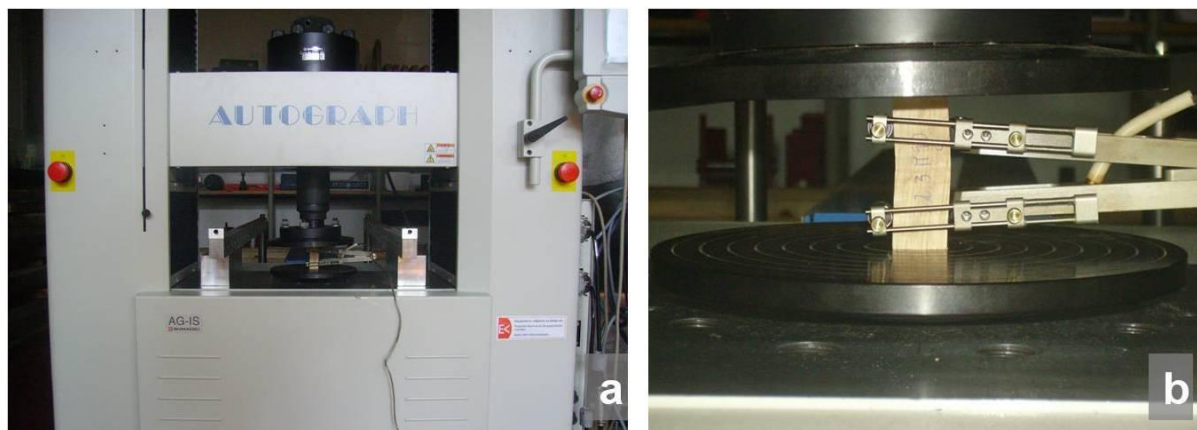


Figura 11. Máquina de ensaios universal SHIMADZU AG-250KNIS-MO com acessórios para compressão (a) e pormenor de um ensaio de compressão axial (b)

Determinação do Módulo de Elasticidade

No caso da determinação do módulo de elasticidade por compressão axial, procedeu-se da mesma forma descrita para o ensaio de flexão estática. Também aqui foi necessário recorrer aos gráficos de Deformação/Carga, para determinar o declive da recta de regressão. Depois de realizada a análise gráfica, aplicou-se a fórmula (4), onde o factor 50 corresponde à distância entre os dois braços do extensómetro.

$$E_c = \frac{\Delta F}{\Delta l} \times \frac{50}{bh} \quad (4)$$

onde:

E_c – módulo de elasticidade à compressão axial, expresso em N/mm^2

$\frac{\Delta F}{\Delta l}$ - declive da recta de regressão

l – distância entre apoios, expressa em milímetros

b, h – dimensões transversais do provete, expressas em milímetros

Determinação da tensão de ruptura

Para a determinação da tensão de ruptura determinada por flexão estática, utilizou-se a equação (5), apresentada na norma NP 618.

$$\sigma_{cH} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{bh} \quad (5)$$

Onde:

σ_{cH} – tensão de ruptura à compressão, no momento do ensaio, expressa em N/mm^2

$F_{m\acute{a}x}$ – força de ruptura, expressa em newtons

l – distância entre apoios, expressa em milímetros

b, h - dimensões transversais do provete, expressas em milímetros

À semelhança do que se fez no ensaio de flexão estática, também aqui houve a necessidade de reportar a tensão de ruptura para o teor de água de 12%, tendo sido utilizada a fórmula (6), referida na norma NP 618.

$$\sigma_{12} = \sigma_{cH} [1 + k(H - 12)] \quad (6)$$

Onde:

σ_{12} – tensão de ruptura a 12% de teor de água, expressa em N/mm^2

σ_{cH} – tensão de ruptura no momento do ensaio, expressa em N/mm²

k – coeficiente de valor 0,05

H – teor de água do provete no momento do ensaio, expresso em %.

3.2.2.3. Fendimento

Após retirados os provetes para a compressão, foi ainda possível retirar dos provetes ensaiados à flexão estática, provetes sem defeitos para o ensaio de fendimento, com dimensões 2X2X4,5 cm (Figura 12b). O ensaio de fendimento decorreu segundo as metodologias descritas na norma NP 622, numa máquina de ensaios universal AMSLER de 4 kN de capacidade.

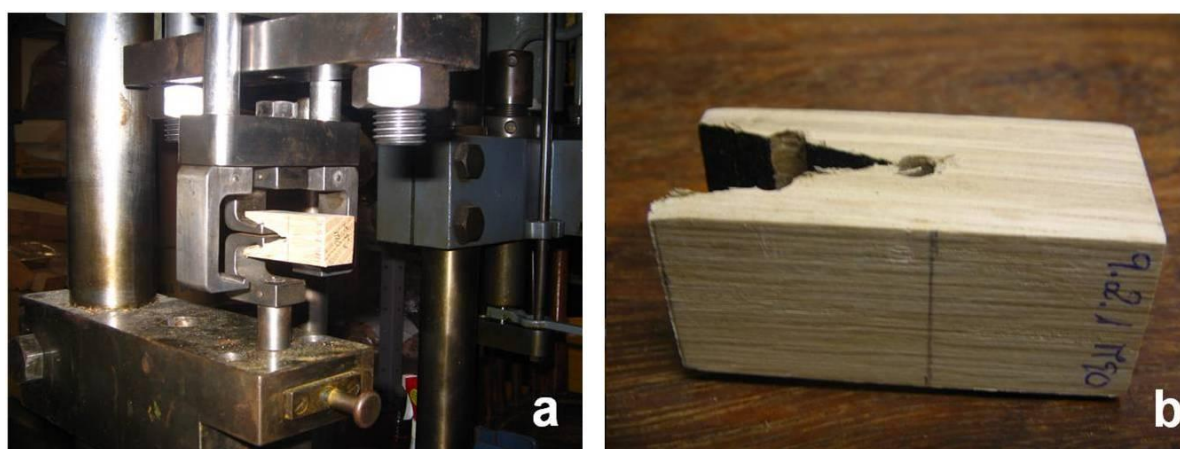


Figura 12. Ensaio de fendimento (a) e exemplo de um provete antes do ensaio (b)

Antes do ensaio mediu-se a dimensão transversal do provete perpendicular à direcção em que seria aplicada a força. O provete foi colocado na máquina de ensaio, de forma que os eixos longitudinais do provete e das peças metálicas ficassem no mesmo plano vertical (Figura 12a). Foi aplicada uma força a velocidade constante de modo a ocorrer ruptura ao fim de 3 minutos, sendo a força de ruptura a força máxima atingida durante o ensaio. No caso da ruptura não se ocorrer na secção longitudinal do provete perpendicular à direcção da aplicação da força, o ensaio não se considera válido.

Determinação da força unitária de fendimento

Para determinar a força unitária de fendimento recorreu-se à fórmula apresentada na norma utilizada (7), sendo depois corrigida ao teor de água de 12% (8).

$$F'_H = \frac{F}{b} \quad (7)$$

$$F'_{12} = F'_H [1 + k(H - 12)] \quad (8)$$

onde:

F'_H – força unitária de ruptura por fendimento a H% de teor de água, expressa em N/mm

F'_{12} - força unitária de ruptura por fendimento a 12% de teor de água, expressa em N/mm

F – força de ruptura do provete, expressa em newton

b - dimensão transversal do provete, expressa em milímetros

H – teor de água do provete no momento do ensaio, expresso em percentagem

k – coeficiente de valor 0,015 (segundo a norma NP 622)

3.2.3. Ensaio de dureza

Foram obtidos provetes com dimensões 5x2,5x20 cm na direcção radial, transversal e tangencial para a realização dos ensaios de dureza. Estes provetes foram retirados do borne e do cerne. Os ensaios foram realizados em ambiente condicionado com $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura e $65\% \pm 5\%$ de humidade relativa do ar, numa máquina de ensaios universal AMSLER de 4 kN de capacidade (Figura 13a).

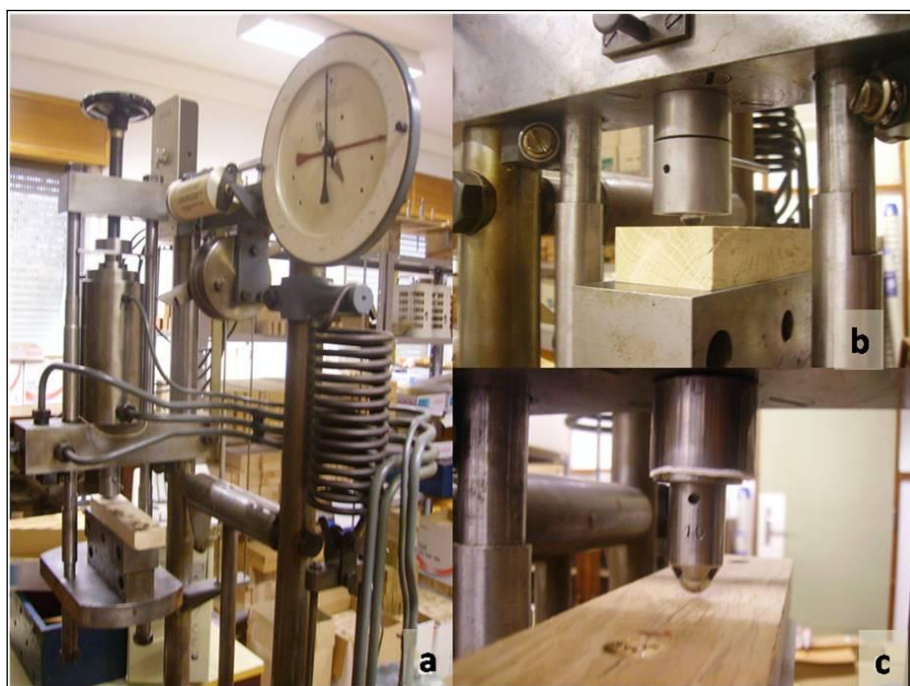


Figura 13. Máquina de ensaios universal AMSLER (a) com pormenores do ensaio de dureza com esfera de 11 mm (b) e com esfera de 10 mm (c).

Nas extremidades dos provetes foram realizadas duas leituras segundo a norma ISO 3350, tendo sido introduzida carga a uma velocidade constante, até que metade da esfera de ensaio com 11mm de diâmetro penetrasse na madeira (Figura 13b). De seguida, realizaram-se ensaios (duas leituras por provete) segundo a norma EN 1534, aumentando a força aplicada a velocidade constante de modo a atingir 1kN em (15 ± 3) s, mantendo a força durante (25 ± 5) s. Neste ensaio foi utilizada uma esfera de 10 mm de diâmetro (Figura 13c).

Após a realização dos ensaios deixaram-se os provetes a repousar no mínimo três minutos, sendo depois realizadas as medições das mossas residuais, medindo-se os seus diâmetros cruzados, segundo as direcções apresentadas na Figura 14.

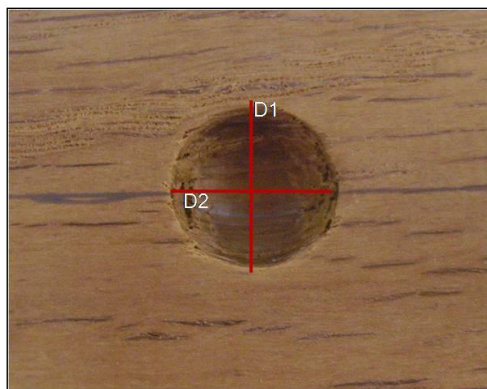


Figura 14. Medição dos diâmetros cruzados das mossas

Para finalizar a determinação da dureza, realizou-se ainda um terceiro ensaio, nos mesmos provetes, aproveitando o local onde foi medida a dureza pela norma EN 1534, utilizando a esfera de 10mm de diâmetro. Contudo neste ensaio introduziu-se a carga a velocidade constante até que metade da esfera penetrasse na madeira.

Uma vez que se calcularam tipos de dureza distintos, a dureza de Janka (HD) em que a esfera de ensaio é introduzida na madeira até metade do seu diâmetro e que é calculada pela fórmula 9. Determinou-se ainda a dureza de Brinell (HB) onde é aplicada a carga pré definida de 1kN, calculada pela fórmula 10.

$$HD = \frac{F_{máx}}{\pi \left(\frac{D}{2} \right)^2} \quad (9)$$

$$HB = \frac{2F}{\pi D [D - (D^2 - d^2)^{\frac{1}{2}}]} \quad (10)$$

Onde:

HD – dureza de Janka expressa em N/mm²

HB – dureza de Brinell expressa em N/mm²

F_{máx} – força máxima atingida durante a penetração da esfera no provete à profundidade determinada, expressa em newton

D – diâmetro da esfera, expressa em milímetros

F - força nominal, expressa em newton

d - diâmetro da indentação residual, expresso em milímetros

3.2.4. Determinações complementares aos ensaios

Nesta secção são apresentadas as metodologias utilizadas para a determinação dos teores de água, bem como as massas volúmicas dos provetes ensaiados.

Determinação do teor de água

O teor de água foi determinado segundo a norma NP 614. Os provetes foram pesados e colocaram-se na estufa a $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, durante 24h. Retiraram-se os provetes e deixaram-se arrefecer num exsiccador com sílica-gel (absorvente de humidade) e foram novamente pesados. Os resultados são apresentados em percentagem e calculam-se segundo a fórmula (11).

$$H = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (11)$$

Onde:

H – teor de água da madeira em percentagem

m_1 - massa húmida do provete, expressa em g

m_2 - massa seca do provete, expressa em g

Determinação da massa volúmica

A massa volúmica foi determinada segundo a norma NP 616. Assim, determinou-se o volume dos provetes pela medição das suas dimensões e pesaram-se para obter a sua massa. Por fim, aplicou-se a fórmula (12).

$$\rho_H = \frac{m_H}{v_H} \quad (12)$$

Onde:

ρ_H – massa volúmica do provete, expressa em g/cm^3

m_H – massa do provete, expressa em g

v_H – volume do provete em cm^3

Como se verificou os provetes apresentavam variações no teor de água, pelo que houve a necessidade de corrigir a 12%, de modo a ser possível a comparação dos valores. Para tal, e como se referencia na norma NP 616, utilizou-se a fórmula 9, para corrigir a massa volúmica.

$$\rho_{12} = \rho_h \frac{(100 + 12) \times (100 + \alpha_v H)}{(100 + H) \times (100 + 12\alpha_v)} \quad (12)$$

Onde:

H – teor de água da madeira em percentagem

ρ_H – massa volúmica do provete determinada quando do ensaio, expressa em g/cm^3

ρ_{12} - massa volúmica do provete reportada a 12% de humidade

α_v – coeficiente de retracção volumétrica total

Para a realização destes cálculos, o coeficiente de retracção volumétrica utilizado foi o referido por Carvalho (1997), para a madeira de *Quercus faginea*, ou seja 0,5

3.2.5 Ensaios de durabilidade

De acordo com a norma EN 350-1, foram escolhidos provetes de seis árvores, de três árvores por proveniência, fazendo um total de 36 provetes de madeira de *Quercus faginea* e seis provetes testemunho de borne de *Pinus pinaster*. O ensaio decorreu segundo a norma EN 118, em ambiente condicionado ($24^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura e $80\% \pm 5\%$ de humidade relativa do ar), no Núcleo de Estruturas de Madeira do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Segundo o esquema da Figura 15, fixaram-se tubos de vidro com 11cm de comprimento e 2,2 - 2,5cm de diâmetro, abertos em ambas as extremidades, com fita adesiva (não tóxica para as térmitas), no centro de provetes com dimensões 5X1,5X5cm. Em cada tubo introduziu-se um intercalar (pedaço de madeira de pinho), que ficou assente na superfície da madeira, vertendo-se de seguida a areia (substrato), previamente humedecida numa proporção de um volume de água para quatro volumes de areia.

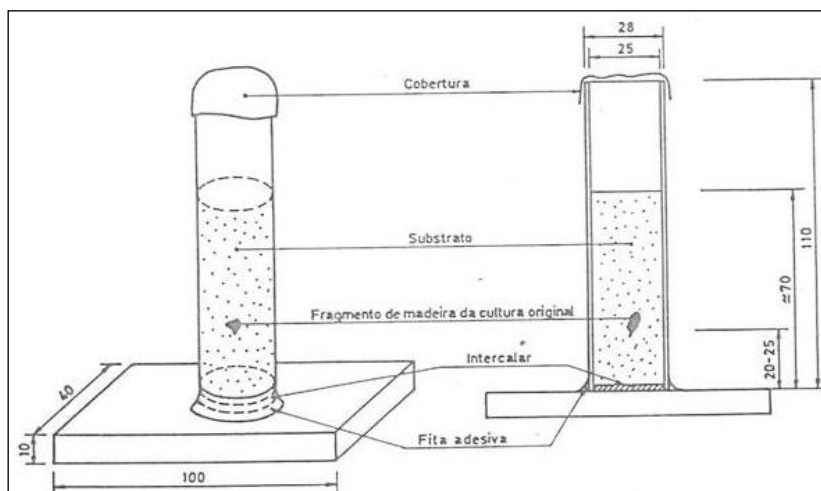


Figura 15. Esquema da montagem dos ensaios de durabilidade (Fonte: EN 118)

A areia ocupou 2/3 do volume do tubo de vidro sem estar compactada. Colocou-se, em cada tubo, no meio da areia um pequeno fragmento de madeira da cultura original de térmitas, bem como um conjunto de 250 obreiras previamente escolhidas de colónias provenientes da Lagoa de Albufeira (Figura 16a). Os ensaios foram colocados em recipientes individuais de

modo a evitar a fuga das térmitas e conservaram-se durante oito semanas. Inspeccionaram-se os ensaios diariamente, de modo a rectificar a humidade juntando-se água sempre que necessário. Terminadas as oito semanas do ensaio, desmontaram-se os tubos (Figura 16b) e contaram-se as térmitas vivas, determinando a percentagem de sobrevivência das obreiras e a presença de soldados e/ou ninfas vivos. O grau de ataque é determinado, por exame visual, segundo a escala apresentada no Quadro 1.

Por fim, classificou-se a durabilidade natural da madeira de carvalho-português ao ataque de térmitas, segundo o Quadro 2.

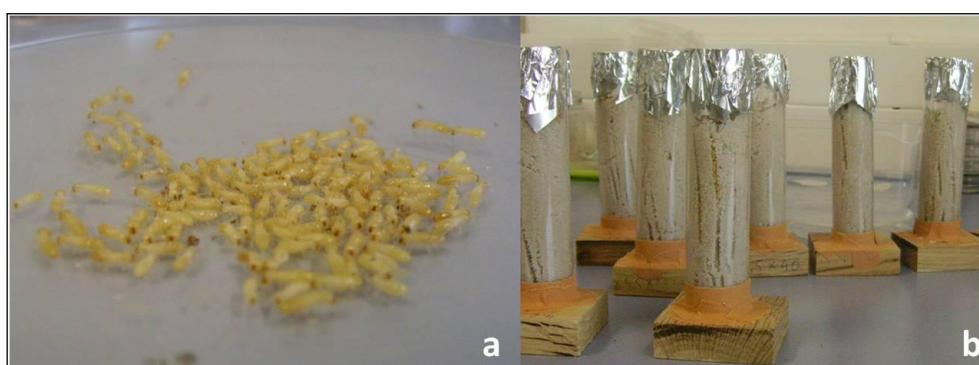


Figura 16. Térmitas utilizadas nos ensaios (a) e ensaios já montados (b)

Quadro 1. Escala para avaliação visual do ataque de térmitas, segundo a norma europeia EN 118.

Grau	Descrição
0	Sem ataque
1	Tentativa de ataque: Erosão superficial de profundidade insuficiente para serem medidas em área ilimitada do provete
2	Ataque ligeiro: Erosão com cerca de 1 mm de profundidade, limitada a uma área inferior a 1/10 da área superficial do provete; um único túnel com profundidade até 3 mm
3	Ataque moderado: Erosão inferior a 1 mm em mais de 1/10 da área do provete; erosão entre 1 e 3 mm de profundidade numa área inferior a 1/10 do provete; túnel isolado com mais de 3 mm de profundidade não formando cavidades
4	Ataque forte: Erosão entre 1 e 3 mm de profundidade numa área superior a 1/10 da área do provete; túnel com profundidade superior a 3mm e que se alarga em cavidades no corpo do provete.

Quadro 2. Classes de durabilidade natural da madeira ao ataque de térmitas (Fonte: EN 350-1)

Classe de Durabilidade	Descrição	Média de ataque
D	Durável	0 - 1
M	Moderadamente durável	2
S	Susceptível	3 - 4

3.2.6 Utilização da madeira de *Quercus faginea* como revestimento de superfícies

Os provetes utilizados nesta fase do trabalho foram retirados da zona do cerne das tábuas iniciais, apresentando inicialmente as dimensões 5X2,5cm de secção e 20cm de comprimento, que foram reduzidos manualmente às dimensões 5X0,5X20 cm; 5X0,3X20 cm e 5X0,2X20 cm. Estes provetes de carvalho foram colados por meio de cola tipo PVAc a régua de espruce com 1cm de espessura.

Em cada provete compósito realizaram-se duas leituras, segundo a Norma EN 1534 para a determinação da resistência à indentação em pavimentos, de modo que a força aplicada foi aumentando a velocidade constante de modo a atingir 1kN em (15 ± 3) s, sendo mantida durante (25 ± 5) s. Após a realização dos ensaios, e à semelhança do que já tinha sido feito quando da realização dos ensaios de caracterização, mediram-se os diâmetros das mossas residuais com o auxílio de uma lupa. Os cálculos foram realizados com a equação 12, procedendo-se à comparação dos resultados obtidos para madeira maciça (provetes com 25mm de espessura), com os resultados obtidos para os provetes compósitos (provetes compostos por madeira de carvalho e de espruce).



Figura 17. Ensaio de dureza (a) e pormenor de algumas peças de soalho de Carvalho-português (b)

3.2.7. Análise estatística

Para a análise estatística dos resultados obtidos utilizou-se o software SPSS for Windows versão 17.0. Nas análises de regressão, assumiu-se como nível de significância 5%. Nos testes à normalidade foi utilizado o teste Kolmogorov-Smirnov.

4. Resultados

4.1. Massa volúmica

As massas volúmicas para cada provete ensaiado foram determinadas no fim de cada ensaio. A Figura 18 amostra a distribuição dos valores obtidos no total dos 42 provetes ensaiados. Os valores médios e as medidas de dispersão da massa volúmica, para ambas as proveniências e distâncias à medula encontram-se no Quadro 3.

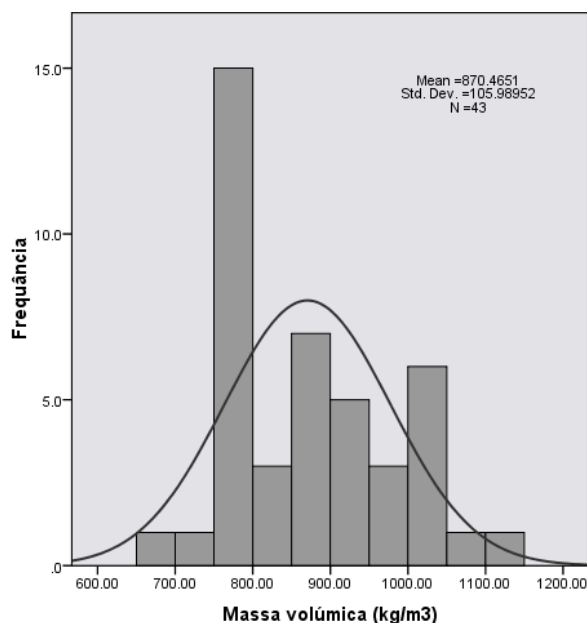


Figura 18 .Histograma referente às massas volúmicas determinadas para os provetes de caracterização mecânica.

Quadro 3. Comparação das massas volúmicas (kg/m^3) obtidas para os provetes ensaiados à flexão estática e à compressão axial para os dois locais de proveniência e as duas posições radiais dos provetes.

	Distância à medula	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Cortiços	90%	687	1030	826	101	12,3
	10%	737	1035	934	109	11,6
Gralhós	90%	752	972	813	66	8,1
	10%	762	1111	919	104	11,3
Total		687	1111	870	106	12,2

Verifica-se que a distribuição das massas volúmicas determinadas para os provetes utilizados nos ensaios mecânicos apresenta uma distribuição normal, verificado pelo teste à normalidade (apresentado em anexo). A média das massas volúmicas obtidas é de 870 kg/m^3 , variando entre 687 e 1111 kg/m^3 (Quadro 3). Segundo a tabela de classificação dos valores característicos das madeiras apresentada por Carvalho (1996), a madeira de *Quercus faginea* insere-se na classe das madeiras pesadas. O valor obtido encontra-se cerca de 20 kg/m^3 abaixo do valor apresentado por Carvalho (1997), contudo mantém-se a classificação apresentada pelo autor.

4.2. Módulo de elasticidade

Os Quadros 4 e 5 apresentam os resultados médios dos ensaios realizados à flexão estática e compressão axial. Os valores determinados para cada provete encontram-se em anexo.

Quadro 4. Módulos de elasticidade à compressão axial em N/mm^2 para a madeira de *Quercus faginea* de duas proveniências e com provetes retirados em duas posições radiais

	Distância à medula	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Cortiços	90%	2528	12338	6872	3455	50,3
	10%	5440	13317	8259	2877	34,8
Gralhós	90%	5042	12910	7729	2336	30,2
	10%	4525	10447	6916	1847	26,7
Total		2528	13317	7402	2593	35,0

Quadro 5. Módulos de elasticidade à compressão axial em N/mm^2 para a madeira de *Quercus faginea* de duas proveniências e com provetes retirados em duas posições radiais

	Distância à medula	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Cortiços	90%	5243	10097	8245	2039	24,7
	10%	6937	10128	8221	1306	15,9
Gralhós	90%	7003	9268	8003	609	7,6
	10%	6294	10533	8383	1382	16,5
Total		5243	10533	8204	1323	16,1

Os resultados obtidos mostram que a madeira de carvalho-português apresenta um módulo de elasticidade de 7402 N/mm^2 à compressão axial, e ligeiramente superior quando se trata do ensaio de flexão estática, com um valor de 8204 N/mm^2 . Nos ensaios de compressão, os valores variaram entre 2528 N/mm^2 e 13317 N/mm^2 , enquanto para nos ensaios de flexão estática essa variação encontra-se entre 3609 N/mm^2 e 10533 N/mm^2 , significando uma maior dispersão de resultados.

As Figuras 19 e 20 apresentam a relação do módulo de elasticidade com a massa volúmica. As regressões apresentadas são estatisticamente significativas, uma vez que apresentam significâncias inferiores a 5%. Assim, e apesar da baixa correlação entre as duas variáveis, é possível afirmar que no caso do módulo de elasticidade à flexão estática, 18% da variabilidade é explicada pela recta de regressão, enquanto no caso da compressão axial apenas 13% da variabilidade é explicada.

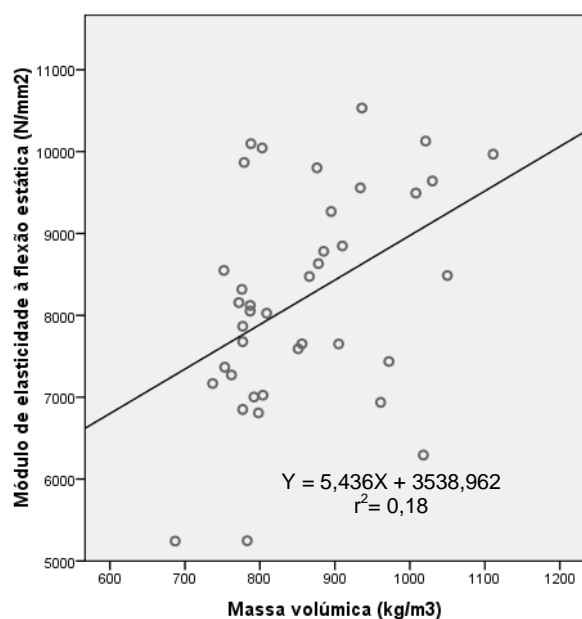


Figura 19. Correlação entre o módulo de elasticidade à flexão estática e a massa volúmica.

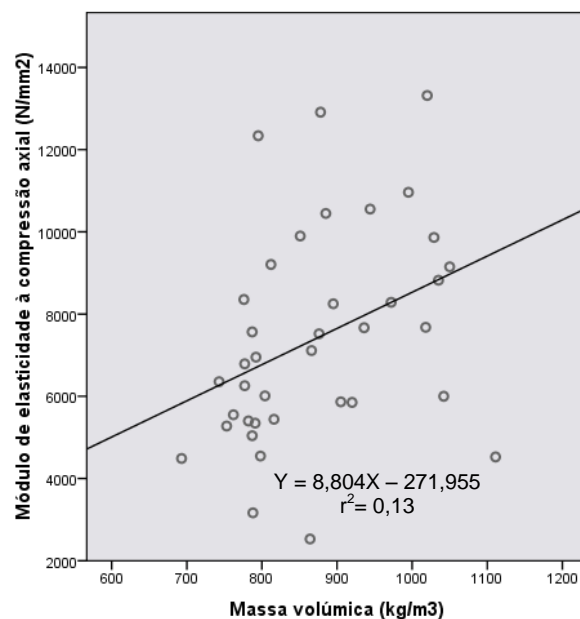


Figura 20. Correlação entre o módulo de elasticidade à compressão e a massa volúmica.

4.3. Determinação da tensão de ruptura

Os resultados médios de tensão de ruptura determinados pelos ensaios de flexão estática e compressão axial estão representados nos Quadros 6 e 7. Os valores determinados para cada provete encontram-se em anexo.

Quadro 6. Tensões de ruptura à compressão, em N/mm^2 para a madeira de *Quercus faginea* de duas proveniências e com provetes retirados em duas posições radiais

	Distância à medula	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
Cortiços	90%	30	64	45	12	26,1
	10%	33	75	50	12	25,0
Gralhós	90%	39	56	45	6	12,7
	10%	35	60	49	8	16,3
Total		30	75	47	9	19,9

Quadro 7. Tensões de ruptura à flexão estática, em N/mm^2 para a madeira de *Quercus faginea* de duas proveniências e com provetes retirados em duas posições radiais

	Distância à medula	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
Cortiços	90%	67	122	93	20	22,0
	10%	73	123	97	24	25,1
Gralhós	90%	86	131	97	12	12,1
	10%	53	135	105	25	24,0
Total		53	135	99	20	20,4

No ensaio de compressão axial os valores variaram entre 30 e 70 N/mm², no ensaio de flexão estática entre 53 e 135 N/mm², significando amplitudes totais de 40 N/mm² e 82 N/mm², respectivamente.

Os resultados obtidos por compressão axial revelam que a madeira tem uma tensão de ruptura de 47 N/mm², e de 99 N/mm² para a flexão estática, pelo que, segundo a tabela de classificação dos valores característicos das madeiras apresentada por Carvalho (1996), a madeira de *Quercus faginea* apresenta um comportamento médio relativamente à compressão axial fraco quanto à flexão estática. Carvalho (1997) refere que esta espécie tem uma resistência média tanto à flexão estática (149 N/mm²) como à compressão axial (53 N/mm²).

Nas Figuras 21 e 22 apresenta-se a correlação entre a tensão de ruptura e a massa volúmica dos provetes. A correlação é fraca, tal como acontecia no caso dos módulos de elasticidade. Contudo a correlação entre as tensões de ruptura e a massa volúmica é superior no caso da compressão axial. À semelhança do que se verificou no caso do módulo de elasticidade, também no caso dos módulos de tensão de ruptura para um nível de significância de 5% é possível afirmar que parte destes valores é explicada pela massa volúmica.

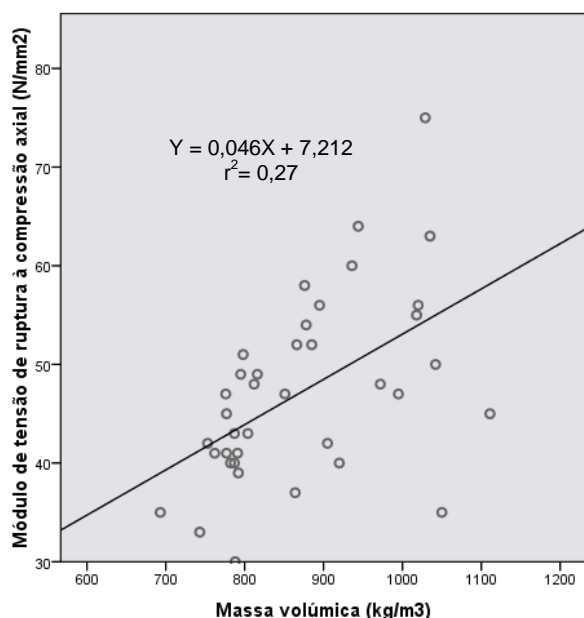


Figura 21. Correlação da tensão de ruptura à compressão axial com a massa volúmica.

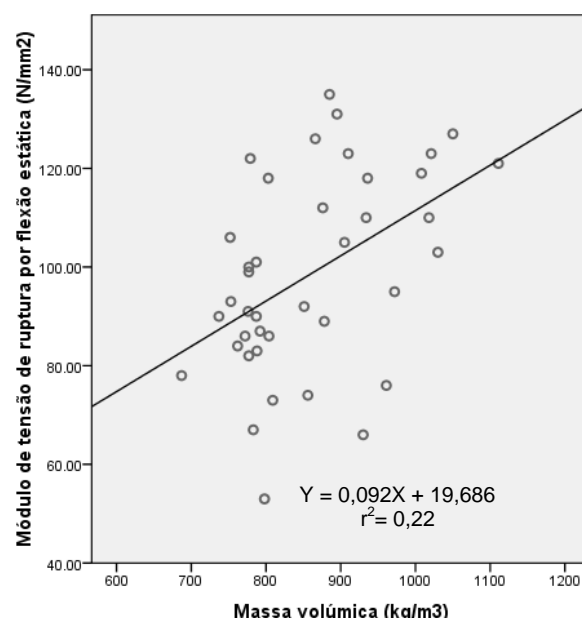


Figura 22. Correlação da tensão de ruptura à flexão estática com a massa volúmica.

Uma vez que foram determinados os módulos de elasticidade à flexão estática e à compressão axial, importa verificar a relação de cada um com a tensão de ruptura, pelo que se apresentam as nuvens de pontos representativas dos valores obtidos nas Figuras 23 e

24. Ambas as regressões são estatisticamente significativas. Verifica--se uma maior dispersão dos valores no caso da compressão axial, embora 31% da variação do módulo de elasticidade possa ser explicada pela variação da tensão de ruptura à compressão axial. No que respeita ao ensaio de flexão estática, verifica-se que cerca de 44% da variação do módulo de elasticidade pode ser explicada pela variação da tensão de ruptura à flexão estática.

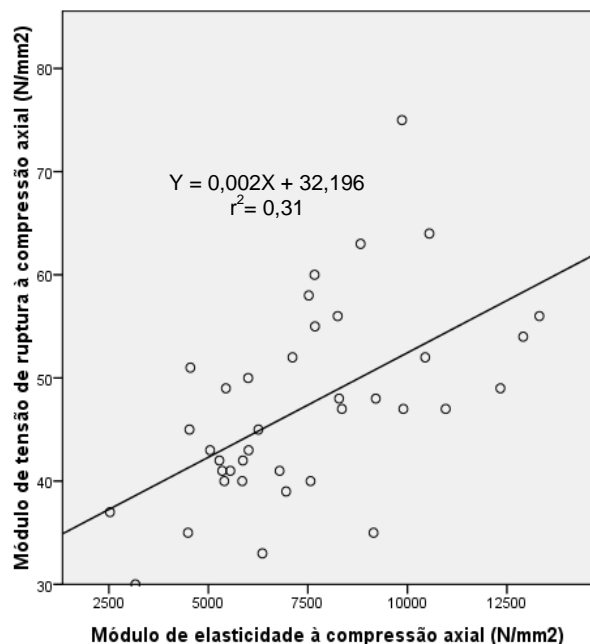


Figura 23. Correlação entre a tensão de ruptura e o módulo de elasticidade determinado por compressão axial.

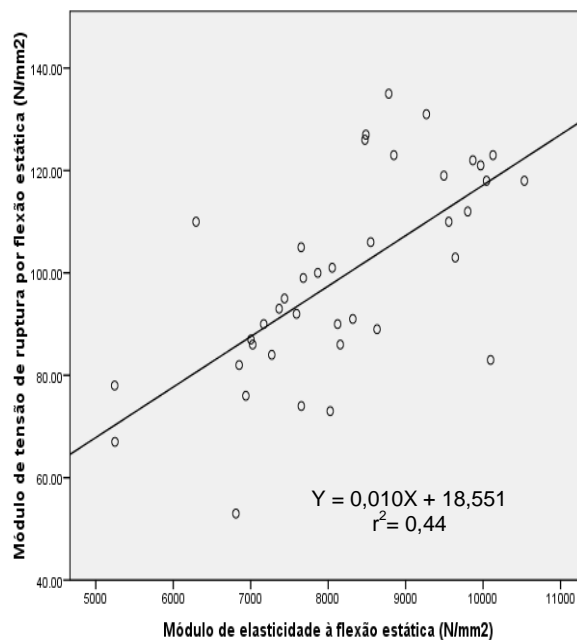


Figura 24. Correlação entre a tensão de ruptura e o módulo de elasticidade determinados por flexão estática.

4.4. Força unitária de ruptura por fendimento

Com o ensaio do fendimento, foram determinados valores da força unitária de ruptura, encontrando-se as médias no Quadro 8. A força unitária de ruptura por fendimento varia entre 22 N/mm e 43 N/mm, significando uma amplitude total de 21 N/mm. Apesar do baixo número de provetes analisados, verifica-se um coeficiente de variação superior em provetes que se encontravam a 90% de distância à medula. O valor médio de 33 N/mm² enquadra a madeira em estudo na classe Forte pela tabela de classificação de Carvalho (1996),.

Quadro 8. Forças unitárias de ruptura por fendimento, em N/mm para a madeira de *Quercus faginea* de duas proveniências e com provetes retirados em duas posições radiais

	Distância à medula	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
Cortiços	90%	22	36	31	5	17,4
	10%	30	40	34	4	11,9
Gralhós	90%	25	40	32	4	13,9
	10%	28	43	35	4	12,4
Total		22	43	33	5	13,7

As Figuras 25 e 26 apresentam os valores obtidos na forma de histograma, bem como a correlação destes com a massa volúmica determinada para cada provete. Verifica-se que se desenha uma curva normal, sendo esta normalidade confirmada pelo teste apresentado no Anexo 16. A recta de regressão da força unitária de fendimento com a massa volúmica é estatisticamente significativa, explicando 21% da variação.

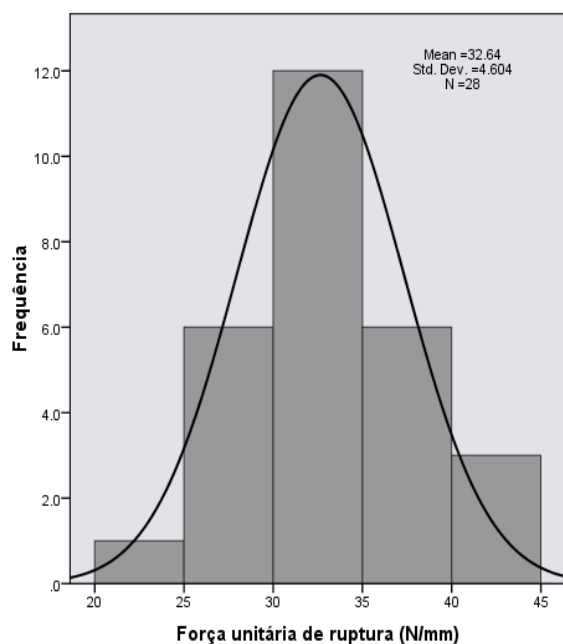


Figura 25. Histograma referente às forças unitárias de ruptura por fendimento.

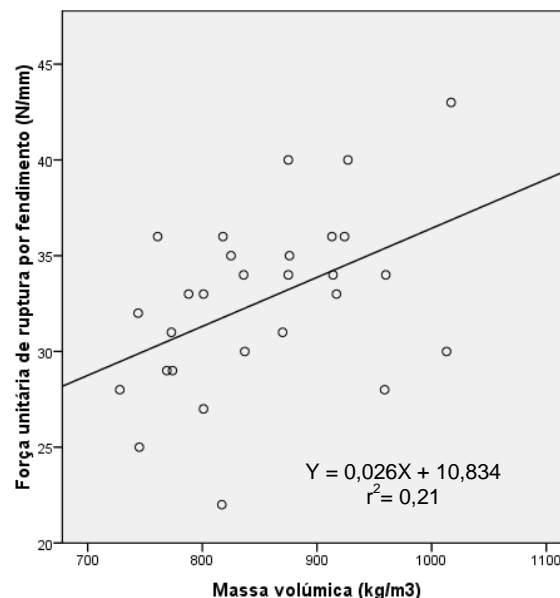


Figura 26. Correlação entre os valores de força unitária de ruptura por fendimento e a massa volúmica dos provetes.

4.5. Durabilidade ao ataque de térmitas subterrâneas

No Quadro 9 apresentam-se as taxas de sobrevivência e os graus de ataque correspondentes por provete de madeira de carvalho-português, para as duas origens ensaiadas (1- Cortiços, 2 – Gralhós). O ensaio de durabilidade natural considerou-se válido, dado que para as seis amostras de pinheiro bravo (testemunho) foi obtida uma taxa de sobrevivência média de $51,9\% \pm 10,9\%$ para um grau de ataque 4.

Quadro 9. Resultados do ensaio à durabilidade natural da madeira de *Quercus faginea* Lam

Árvore	ID_provete	% Obreiras	Soldados/ Ninfas*	Grau de ataque
1	1.2.4 A	18	-	2
	1.2.4 B	0	-	2
	1.2.4 C	0	-	2
	1.2.4 D	41,2	S	2
	1.2.4 E	0	-	3
	1.2.4 F	6	-	1
2	2.2.4 A	26	S	1
	2.2.4 B	0	-	1
	2.2.4 C	0	-	1
	2.2.4 D	0	-	1
	2.2.4 E	0	-	1
3	3.2.3 A	0	-	2
	3.2.3 B	57,6	-	4
	3.2.3 C	0	-	1
	3.2.3 D	0,4	-	1
	3.2.3 E	32,4	S	4
	3.2.3 F	6	-	2
4	4.2.3 A	0	-	1
	4.2.3 B	0	-	3
	4.2.3 C	12,4	-	2
	4.2.3 D	0	-	3
	4.2.3 E	0	-	2
	4.2.3 F	43,6	S	4
5	5.2.1 A	0	-	1
	5.2.1 B	1,6	S	2
	5.2.1 C	19,2	-	2
	5.2.1 D	0	-	2
	5.2.1 E	0	-	1
	5.2.1 F	46,0	S	4
6	6.5.3 A	11,6	-	2
	6.5.3 B	0	-	1
	6.5.3 C	29,2	-	2
	6.5.3 D	0	-	1
	6.5.3 F	0,8	-	1

* Presença de soldados e/ou ninfas vivas no final do ensaio

A madeira de carvalho português considera-se, segundo a norma EN 350-1, como medianamente durável, tendo apresentado um grau de ataque médio de $1,9 \pm 1,0$ e uma taxa de sobrevivência por parte das térmitas de $9,7\% \pm 16,2\%$.

4.6. Dureza

Para a caracterização da madeira de *Quercus faginea* quanto à dureza, realizaram-se ensaios com esferas de diâmetros diferentes, que foram forçadas a entrar na madeira até determinada profundidade (metade do diâmetro da esfera). Os resultados médios de dureza estão representados no Quadro 10 e as distribuições destes nas Figuras 26 a 29. Apresentam-se os valores determinados individualmente em anexo.

Quadro 10. Dureza determinada com esferas de diferente diâmetro para borne e para cerne, em N/mm^2 para a madeira de *Quercus faginea* de duas proveniências e com provetes retirados do cerne e do borne

	Diâmetro da esfera	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Cerne	11	73	177	101	27	27,0
	10	44	135	76	24	31,6
Borne	11	76	138	94	16	16,6
	10	46	103	67	15	21,7

A dureza é superior quando a esfera de teste tem maior diâmetro, tanto para o borne como para o cerne. Verifica-se, ainda, que a dureza do cerne é superior à do borne. Com a esfera de 11 mm de diâmetro, ou seja, para a esfera utilizada na determinação da dureza pelo método de Janka, verifica-se um coeficiente de variação superior para o cerne quando comparado com o borne.

Nas Figuras 27 a 30 é possível verificar a distribuição das leituras realizadas por classe de dureza. No caso das leituras realizadas com a esfera de 11 mm, em provetes de cerne (Figura 27), verifica-se um maior número de leituras na classe de dureza $[70, 100] \text{ N/mm}^2$, ligeiramente inferior à média determinada. Ainda no mesmo gráfico, encontram-se duas leituras muito superiores às restantes, tendo sido realizadas em provetes provenientes da mesma árvore e da mesma tábu. Estes valores podem estar relacionados com a massa volúmica, uma vez que apresentam uma massa volúmica superior a 1000 kg/m^3 .

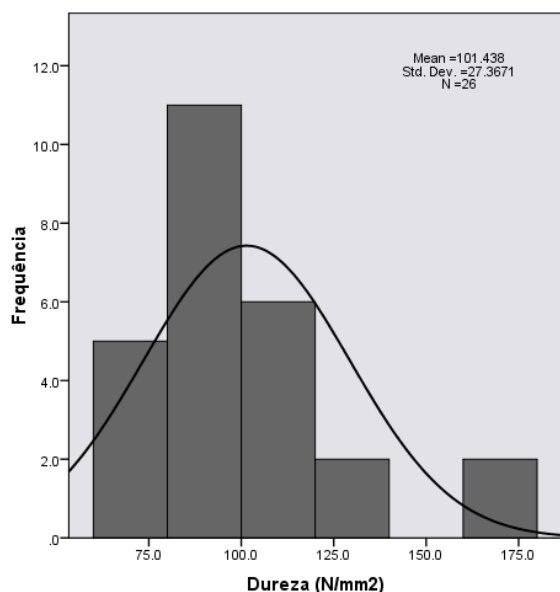


Figura 27. Histograma referente à dureza determinada com a esfera de 11 mm em cerne.

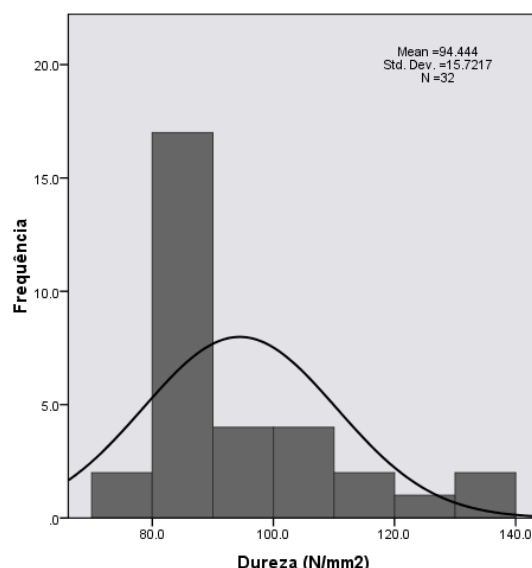


Figura 29. Histograma referente à determinação da Dureza do borne com esfera de 11 mm.

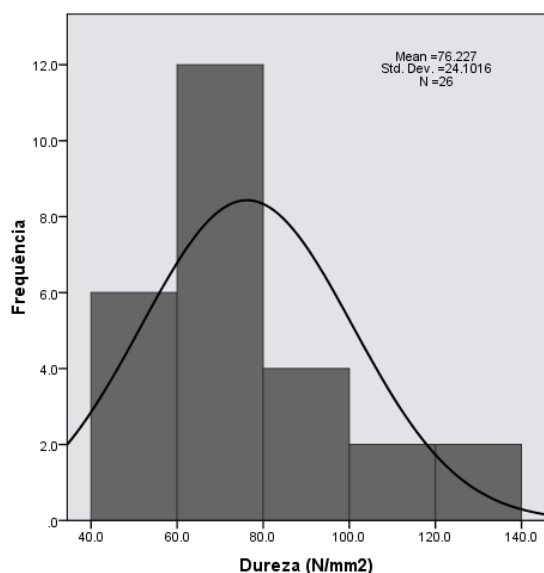


Figura 28. Histograma referente à dureza determinada com a esfera de 10 mm em cerne.

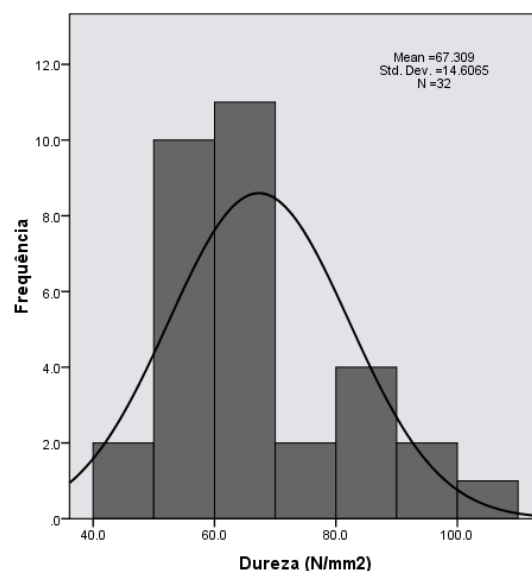


Figura 30. Histograma referente à determinação da Dureza do borne com esfera de 10 mm.

Enquanto nas Figuras 27 e 28, referentes ao cerne, as curvas são muito semelhantes, nas Figuras 29 e 30, referentes à determinação da dureza do borne, isso já não acontece, pois a curva correspondente aos valores obtidos com a esfera de 11 mm é mais achatada do que a curva obtida com os valores determinados com a esfera de 10 mm. Sendo a diferença entre as curvas tão grande, houve a necessidade de verificar a normalidade das distribuições. Tratando-se de amostras pequenas, aplicou-se o teste Kolmogorov-Smirnov e verificou-se

que todas as distribuições são normais, com exceção da curva apresentada na Figura 30, correspondente aos valores determinados com a esfera de 10 mm, em provetes de borne.

No Quadro 11 apresentam-se os valores médios da dureza de Brinell (HB) obtidos para o cerne e para o borne, para provetes com espessura de 25 mm, sendo posteriormente apresentados os histogramas correspondentes (Figuras 31 e 32). Os valores referem-se a resultados de dureza de Brinell, determinada a partir de uma moesa residual, provocada pela aplicação de 1kN de carga. Faz-se a distinção entre os valores obtidos para o borne e para o cerne, contudo não se verifica uma grande diferença.

Quadro 11. Comparação dos valores de dureza (HB), em N/mm^2 , obtidos para borne e cerne com o ensaio de dureza superficial, para provetes com 25 mm de espessura

	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Cerne	38	72	50	10	19,2
Borne	33	71	47	8	16,7

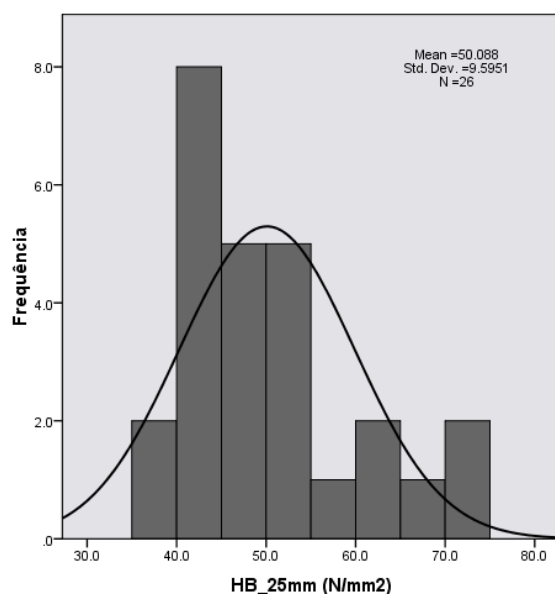


Figura 31. Histograma referente à dureza de Brinell determinada em provetes de cerne com 25 mm de espessura.

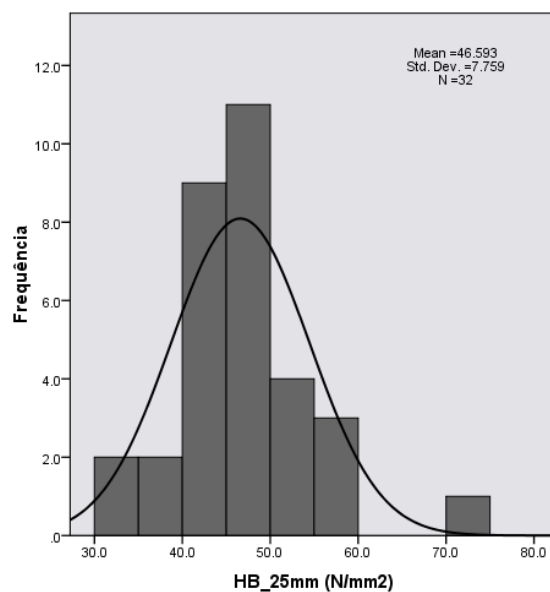


Figura 32. Histograma referente à dureza de Brinell determinada em provetes de borne com 25 mm de espessura.

Nas Figuras 31 e 32 verifica-se uma certa diferença nas curvas ajustadas aos histogramas. Após testar a normalidade dos resultados obtidos verifica-se que ambas as distribuições são normais.

4.7. Dureza de peças de revestimento de superfícies

No Quadro 12 apresentam-se os valores obtidos para a dureza de provetes que simularam peças de revestimento de superfícies, com uma lâmina de madeira de carvalho-português de espessura de 2, 3 e 5 mm colada sobre uma régua de madeira de espruce com 1 cm de espessura.

Determinou-se também a dureza de Brinell em provetes com madeira de espruce e madeira de carvalho português, de modo a estudar a consequência da redução da espessura da lâmina de carvalho nesta propriedade, bem como a comparação dos valores obtidos com os valores apresentados para provetes com 25 mm de espessura. Como se pode confirmar pela análise dos Quadros 11 e 12, os resultados obtidos para os provetes de cerne com 25 mm de espessura não apresentam diferenças significativas quando comparados com os valores obtidos para os provetes compósitos com 5 mm de madeira de carvalho. Contudo, ao diminuir a espessura da madeira de carvalho de 5 mm para 3 mm, verifica-se uma diminuição nos valores de dureza de 9 N/mm². A redução dos valores de dureza torna-se menos significativa quando se comparam os provetes de 3 mm com os de 2 mm, já que neste caso a diminuição é apenas de 3 N/mm².

Nas Figuras 33, 34 e 35 são apresentadas as distribuições dos valores obtidos por classe de dureza. Após o teste à normalidade dos valores, apresentado no Anexo 19, verifica-se que os resultados têm todos distribuição normal.

Quadro 12. Comparação dos resultados obtidos para dureza dos provetes de soalho com 2, 3 e com 5 mm de espessura de carvalho-português

Espessura de carvalho	2mm	3mm	5mm
Mínimo	31	32	33
Máximo	47	57	73
Média	39	42	51
Desvio Padrão	4	7	11
Coeficiente de variação	10,4	16,8	21,2

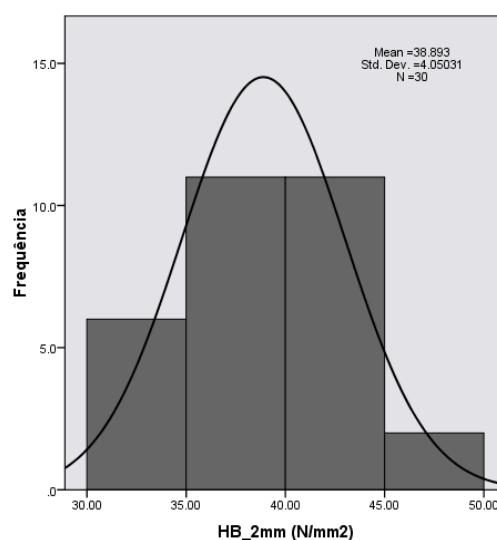


Figura 33. Histograma referente ao ensaio de dureza em soalho com 2mm de espessura de carvalho.

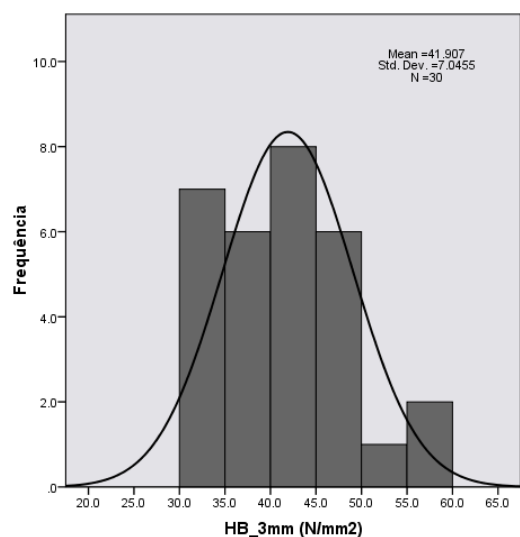


Figura 34. Histograma referente ao ensaio de dureza em soalho com 3mm de espessura de carvalho.

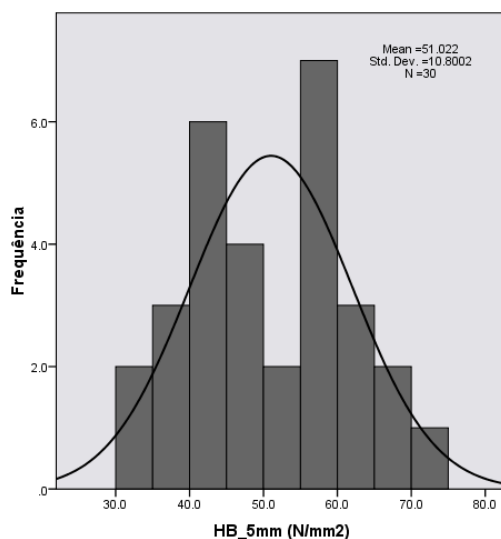


Figura 35. Histograma referente ao ensaio de dureza em soalho com 5 mm de espessura de carvalho.

5. DISCUSSÃO

Os resultados aqui discutidos não podem ser considerados conclusivos para a madeira de *Quercus faginea*, devido ao pequeno número das amostras ensaiadas, o que não permitiu reduzir o factor variabilidade. Ainda assim, no quadro 13 apresentam-se os valores médios determinados para as propriedades físico-mecânicas da madeira estudada, para posterior análise.

Quadro 13. Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de *Quercus faginea* Lam.

PROPRIEDADES		VALORES MÉDIOS
Massa volúmica (kg/m ³)		870
Flexão estática	Módulo de elasticidade (N/mm ²)	8204
	Tensão de ruptura (N/mm ²)	99
Compressão axial	Módulo de elasticidade (N/mm ²)	7402
	Tensão de ruptura (N/mm ²)	47
Dureza	Cerne (N/mm ²)	101 [*]
		76 ^{**}
	Borne (N/mm ²)	94 [*]
		67 ^{**}

* Valor determinado com esfera de 11 mm de diâmetro

** Valor determinado com esfera de 10 mm de diâmetro

A madeira de carvalho português classifica-se como pesada, estando a massa volúmica determinada (870 kg/m³ a 12% de humidade) dentro do intervalo de densidades para outras espécies de carvalhos (Carvalho, 1997; Tsoumis, 2001) e encontrando-se um pouco mais alta que as densidades apresentadas para o *Q. rubra*, *Q. alba* e *Q. robur* por Casaus & Esteban (1997). Os valores determinados variam entre 687 e 1111 kg/m³, sendo os valores de massa volúmica mais elevados, encontrados maioritariamente em provetes de madeira situada mais próxima da medula (10% de distância da medula).

A madeira de *Quercus faginea* apresenta um módulo de elasticidade médio de 8204 N/mm², determinado por flexão estática. Este valor encontra-se muito abaixo dos valores referidos na literatura para outras espécies de carvalhos, como por exemplo, Tsoumis (2001), que refere para carvalhos europeus valores de módulo de elasticidade à flexão estática entre 11560 – 12250 N/mm², e superiores a estes valores para carvalhos americanos. Também Casaus & Esteban (1997) apresentam valores que variam desde 10500 N/mm² (*Quercus robur*) a 13000 N/mm² (*Quercus rubra*). O valor determinado para o carvalho negral, 11200

N/mm² é também superior (Santos, 2005). O facto do valor encontrado ser inferior aos de outros carvalhos cujas características são semelhantes, sugere que essa diferença pode estar relacionada com a presença de pequenos defeitos, como por exemplo pequenos nós e o fio inclinado que se verificou estar presente em vários provetes.

Foi também determinado o módulo de elasticidade para esta madeira no ensaio de compressão axial, de modo a comparar com o obtido no ensaio de flexão estática. Esse valor, segundo Tsoumis (2001), deve ser inferior ao valor determinado por flexão estática. Tal facto verificou-se, uma vez que o valor médio de módulo de elasticidade determinado por compressão axial foi de 7402 N/mm².

Outra característica muito importante que também foi determinada foi a força de ruptura caracterizada pelo MOR (módulo de tensão de ruptura). Neste caso, a madeira caracterizou-se como fraca no que respeita à resistência à ruptura quando o esforço é por flexão estática (99 N/mm²) e como resistência média quando está sujeita a compressão axial (47 N/mm²). Ambos os valores referidos se encontram na mesma dimensão dos valores encontrados na literatura para outros carvalhos. Entre os carvalhos que estão a ser alvo de comparação, apenas o carvalho branco (*Quercus alba*) apresenta um valor do módulo de tensão de ruptura à compressão axial superior ao determinado para o carvalho português e o carvalho americano, apresenta um valor superior em apenas 3 N/mm².

À semelhança do que se passou com os módulos de elasticidade determinados para os dois tipos de esforço, também nestas características se verifica um maior valor para a flexão estática do que para a compressão axial, facto também verificado nas espécies de carvalho referidas.

A massa volúmica é importante na determinação das propriedades de força, e segundo Ivkovic *et al.* (2009) correlaciona-se mais com o MOR do que com o MOE. Este facto verifica-se se se analisarem as Figuras 19 e 20 para o MOE, bem como as Figuras 20 e 21 para a correlação do MOR com a massa volúmica.

A correlação entre o MOE e o MOR, tanto no ensaio de flexão estática, como no ensaio de compressão axial (Figuras 22 e 23) é positiva sendo maior para os valores determinados à flexão estática, quando comparado com os valores determinados à compressão axial.

Com o ensaio de fendimento, determinou-se a força unitária de ruptura por fendimento, a qual define a resistência duma certa madeira à abertura de fendas. O facto dos valores encontrados apresentarem um coeficiente de variação de apenas 13% sugere uma baixa variação dos resultados. Num universo de 28 amostras, considera-se que a resistência da madeira de carvalho português é forte, apresentando um valor médio de força unitária de

ruptura por fendimento de 32 N/mm. Em relação à massa volúmica (Figura 26) existe uma grande dispersão dos resultados, ainda que 21% desses sejam explicados pela massa volúmica. Verificam-se casos em que para uma massa volúmica elevada, a resistência ao fendimento é também elevada.

Também os resultados obtidos quanto à resistência da madeira face ao ataque de térmitas subterrâneas devem ser encarados com reserva, devido à fraca representatividade das amostras e ao facto de a norma EN 350-1 não ter sido inteiramente seguida, pois foram utilizadas apenas duas proveniências, sendo que a norma refere a utilização de três proveniências. Todavia, o facto de no ensaio ter sido encontrado um grau de ataque médio próximo de 2, classifica esta madeira como moderadamente resistente. Desta forma, encontra-se na mesma classe de resistência de outros carvalhos, classificados na norma EN 350-2, bem como o *Quercus petraea*, *Quercus robur* e *Quercus alba*. Contudo quando comparado com o *Quercus rubra*, mais conhecido por carvalho americano, e muito utilizado em Portugal, a madeira do carvalho português apresenta uma maior durabilidade natural, pois o carvalho americano é classificado como pouco resistente ao ataque de térmitas subterrâneas.

A dureza dos materiais está directamente relacionada com a facilidade de laboração, pressupondo-se que madeiras mais duras exigem maior potência e consumo de energia na sua laboração, como por exemplo ao serem aplainadas, furadas ou pregadas (Carvalho, 1996). Assim, esta é uma das características importantes a determinar. Sabe-se ainda que a massa volúmica tem uma forte influência sobre a dureza, sendo que madeiras pesadas têm normalmente durezas elevadas. Realmente no caso da madeira de carvalho português, tal facto é confirmado, uma vez que é uma madeira pesada com uma dureza elevada.

É comum na literatura encontrar valores de dureza característicos de determinada espécie, embora não se faça uma diferenciação entre a dureza do borne e a dureza do cerne. Neste trabalho, além de se ter determinado dois tipos de dureza, ainda se determinou a dureza para o borne e para o cerne em separado, com vista a verificar se a diferença é muito grande. Uma vez que existe uma relação entre a massa volúmica e a dureza, seria de esperar que o borne fosse mais brando que o cerne, e de facto tal é verificado. Assim, para o borne encontrou-se um valor relativamente inferior (94 ± 16 N/mm²) ao encontrado para o cerne (101 ± 27 N/mm²), na determinação com uma esfera de 11 mm de diâmetro. Com uma esfera com 10 mm de diâmetro, obteve-se novamente um valor inferior para o borne (67 ± 15 N/mm²), comparativamente ao cerne (76 ± 24 N/mm²). Fez-se um segundo ensaio com a esfera de 10 mm de diâmetro, no qual se mediu a resistência da madeira, quando é aplicada uma força estática durante alguns segundos. Também neste ensaio se fez distinção entre

borne e cerne, tendo sido encontrados valores de 47 ± 8 N/mm² e 50 ± 10 N/mm², respectivamente. Analisados os resultados obtidos para a dureza, classifica-se a madeira de *Quercus faginea* como muito dura. Em comparação com os carvalhos que se tem vindo a referir, esta madeira apresenta maior dureza, uma vez que todas as madeiras de carvalho já mencionadas são classificadas como duras.

Para finalizar, fizeram-se provetes compostos por madeira de carvalho-português e madeira de espruce, para estudar a dureza em produtos compósitos, e determinar a influência da espessura da lâmina da primeira madeira. Assim, produziram-se provetes com espessuras de 5 mm, 3 mm e 2 mm. Tendo a redução de dimensões sido realizada manualmente, não se conseguiu uma homogeneidade de espessura ao longo de cada provete e de todos os provetes, apesar do esforço elevado para tal. No quadro 14, faz-se uma pequena comparação entre os valores obtidos neste ensaio com os valores obtidos nos ensaios standard de dureza.

Quadro 14. Comparação da dureza da madeira de *Quercus faginea* Lam. para provetes com várias espessuras

Classe de espessura da madeira de Carvalho-português		Dureza (N/mm ²)
25 mm	Cerne	$50,1 \pm 9,6$
	Borne	$48,2 \pm 7,8$
5 mm		$51,0 \pm 10,8$
3 mm		$41,9 \pm 7,0$
2 mm		$38,9 \pm 4,1$

Encontraram-se valores médios de 51 ± 11 N/mm², 42 ± 7 N/mm² e 39 ± 4 N/mm² para as espessuras 5, 3 e 2 mm, respectivamente. Destes valores, retira-se que, como era de esperar, com a diminuição da espessura da madeira de carvalho português, a dureza sofre uma redução, que, no entanto, não é muito acentuada, por exemplo quando se passa de 5 mm para 3 mm. Ao comparar a dureza obtida para os provetes de 25 mm (madeira maciça), seja borne ou cerne, com a dureza obtida para os provetes compósitos com 5 mm de espessura de carvalho, pode afirmar-se que não se justifica utilizar madeira de carvalho para ter por exemplo um piso em carvalho maciço, quando a dureza não sofre grande alteração em provetes com 1/5 da espessura. Uma vez que a dureza desta madeira não se mostrou afectada para as dimensões estudadas, deve procurar-se a optimização do material neste tipo de utilização, com vista a maximizar o aproveitamento da madeira de carvalho-português, já que a qualidade do material compósito não é afectada significativamente.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A madeira de *Quercus faginea* caracteriza-se por ser uma madeira pesada, muito dura, com resistência fraca à flexão estática, resistência média à compressão axial e forte quanto à sua resistência ao fendimento.

No que respeita ao ataque de térmitas subterrâneas, a madeira é moderadamente durável.

Em geral, os resultados obtidos colocam a madeira de carvalho português junto dos restantes carvalhos, como uma madeira com elevado potencial para utilização em revestimento de superfícies. Dada a sua elevada dureza, a madeira de carvalho-português pode ser utilizada em pavimentos, recomendando-se um bom aproveitamento, fazendo uso de produtos compósitos. No entanto, os resultados obtidos de baixa resistência á flexão não aconselha alguns usos, por exemplo em vigamentos.

No entanto, novos ensaios que permitam obter resultados mais representativos para a espécie poderão alterar estas limitações.

7. BIBLIOGRAFIA

Albuquerque (1954) *Carta Ecológica de Portugal*. Ministério da Economia. Direcção Geral de Serviços Agrícolas. Lisboa

Ballarin, A.W. & Nogueira, M. (2005) *Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de Pinus taeda por ultra-som*. Eng. Agríc., Jaboticabal. 25 (1) pp.19-28

Bektas, I.; Alma, M.H.; As, N. (2001) *Determination of the relationships between Brinell and Janka hardness of eastern beech (Fagus orientalis Lipsky)*. Forest Prod. J. 51(11/12) pp. 84-88

Carvalho, A. (1996) *Madeiras Portuguesas. Estrutura anatómica, Propriedades e Utilizações*. Vol. I. Direcção-Geral das Florestas. Lisboa

Carvalho, A. (1997) *Madeiras Portuguesas. Estrutura anatómica, Propriedades e Utilizações*. Vol. II. Direcção-Geral das Florestas. Lisboa

Carvalho, A. & Nunes, J. (1998) *Os carvalhos portugueses*. Floresta e Ambiente. Nº41 p.16

Capelo, J. & Catry, F. (2007) *A distribuição do Carvalho-português em Portugal*. In J. S. Silva (coord.) *Os Carvalhais. Um património a conservar*. Col. Árvores e Florestas de Portugal, 04.Fundação Luso-Americana para o Desenvolvimento / Público / Liga para a Protecção da Natureza. Lisboa pp. 83-94

Casaus, G. & Esteban, G. (1997) *Especies de Maderas Para Carpintería, Construcción y Mobiliario*. Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera, AITIM. 250 pp.

Ceballos, L. & Ruiz de La Torre, J. (2001) *Árboles y Arbustos de la España Peninsular*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid

Correia, A. ; Oliveira, A.C. (2003) *Principais espécies florestais com interesse para Portugal Zonas de influência atlântica*. Lisboa, Direcção-Geral das Florestas

Doyle, J. & Walker, J.C.F (1984) *Indentation hardness of wood*. Wood and Fiber Science 17(3) pp. 369-376

Doyle, J. & Walker, J.C.F (1985) *Indentation of wood by wedges*. Wood Sci. Technol. 19 pp. 47-55

Dumail, J.F, Castéra, P. & Morlier, (1998) *Hardness and basic density variation in the juvenile wood of maritime pine*. Ann. Sci. For. 55 pp. 911-923

EN-118 (2005) *Wood preservatives- Determination of preservative action against Reticulitermes species (European termites) (Laboratory method)*. CEN

EN 350-1 (1994) *Durability of wood and wood-based products-Natural durability of solid wood – Part 1: Guide to the principles of testing and classification of the natural durability of wood*. CEN

EN 350-2 (1994) *Durability of wood and wood-based products-Natural durability of solid wood – Part 2: Guide to natural durability and treatability of selected wood species of importance in Europe*. CEN

EN 408 (2003) *Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties*. CEN

EN 1534 (2000) *Wood flooring – Determination of resistance to indentation (Brinell) – Test method*. CEN

EN 13489 (2002) *Wood flooring – Multi-Layer parquet elements*. CEN

Fabião, A., A. Oliveira & A. V. Correia. (2007) *Conservação, regeneração e exploração dos carvalhais*. In J. S. Silva (coord.) *Os Carvalhais, um Património a Conservar*. Col. Árvores e Florestas de Portugal, 02. Fundação Luso-Americana para o Desenvolvimento / Público / Liga para a Protecção da Natureza. Lisboa. pp.67-81

Faherty, K. & Williamson, T.G. (1995) *Wood engineering and construction handbook*. Second edition. McGraw-Hill. USA

Goes, E. (1991) – *A Floresta Portuguesa. Sua importância e Descrição das espécies de maior interesse*. Imagens & Comunicação, Portucel

Grabner, M.; Muller, U.; Gierlinger, N.; Wimmer, R. (2005) *Effects of heartwood extractives on mechanical properties of Larch*. IAWA Jornal, 26(2) pp. 211-220

Gutierrez Oliva, A. & Plaza Pulgar, F. (1967) *Características Físico-Mecánicas de las Maderas Españolas* – Instituto Florestal de Investigaciones y experiencias. Madrid pp. 103

Haselein, C.R.; Berger, R.; Goulart, M.; Sthal, J.; Trevisan, R.; Santini, E.J.; Lopes, M.C. (2002) *Propriedades de flexão estática da madeira úmida e a 12% de umidade de um clone de Eucalyptus saligna Smith sob o efeito do espaçamento e da adubação*. Ciência Florestal, Santa Maria 12 (2) pp.147-152

Heräjärvi, H. (2004) *Static bending properties of finnish birch wood*. Wood Sci. Technol. (37) pp. 523-530

Hernandez, R.E. (2007) *Influence of accessory substances, wood density and interlocked grain on the compressive properties of hardwoods*. Wood Sci. Technol. 41 pp. 249-265

IFN (2007) – *Resultados do Inventário Florestal Nacional 2005/06*. DGRF. Lisboa

IPQ standard (1973) NP 614. *Madeiras - Determinação do teor em água*

IPQ standard (1973) NP 616. *Madeiras - Determinação da massa volúmica*

IPQ standard (1973) NP 618. *Madeiras - Ensaio de compressão axial*

IPQ standard (1973) NP 619. *Madeiras - Ensaio de flexão estática*

IPQ standard (1973) NP 622. *Madeiras - Ensaio de fendimento*

IQP standard (1989) NP 3928. *Preservação da madeira. Terminologia*

Ivkovic, M.; Gaspare, W. J.; Abarquez, A.; Ilic, J.; Powell, M.B.; Wu, H.X. (2009) – *Prediction of wood stiffness, strength, and shrinkage in juvenile wood of radiata pine*. Wood Sci Technol 43 pp. 237-257

International Organization for Standardization (ISO) (1975a) Wood – *Determination of static hardness*. ISO standard 3350

International Organization for Standardization (ISO) (1975b) Wood – *Determination of ultimate strength in static bending*. ISO standard 3133

Knapic, S., Tavares, F.; Pereira, H. (2006) *Heartwood and sapwood variation in acácia melanoxylon R. Br. trees in Portugal*. Forestry (79) 4 pp 371-380

Knapic, S. (2007a) Utilizações da Madeira do Carvalho-português. In J. S. Silva (coord.) *Os Carvalhais. Um património a conservar*. Col. Árvores e Florestas de Portugal, 04. Fundação Luso-Americana para o Desenvolvimento / Público / Liga para a Protecção da Natureza. Lisboa. Pp. 47-53

Knapic, S.; Louzada, J.L.; Leal, S.; Pereira, H. (2007b) *Radial variation of wood density components and ring width in cork oak trees*. Ann.For. Science (64) pp 211-218

Kollmann, F.F.P. & Côté, W.A. (1968) *Principles of wood science and technology. I solid wood*. Springer-Verlag Berlin. Heidelberg. New York

- Korkut, S.; Akgül, M.; Dündar, T. (2008) *The effects on heat treatment on some technological properties of Scots pine (Pinus sylvestris L.) wood*. Bioresource Technology 99 pp. 1861-1868
- Leal, S.P (2008) *Estudo da variabilidade no crescimento, qualidade e propriedades tecnológicas da madeira de Quercus suber L. com vista à sua utilização como madeira nobre*. Doutoramento em Engenharia Florestal. Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa
- LNEC (1999) *Madeira na construção. Ficha de características - Térmitas subterrâneas*. LNEC – Proc. 033/72/11011, Lisboa
- Machado, J.S & Cruz, H.P. (2005) *Within stem variation of Maritime pine timber mechanical properties*. Holz als Roh – und werkstoff 63:154-159
- Melo, J. R. (1999) *Secagem de madeiras*. Lisboa, Estação Florestal Nacional
- Moreira, J.M. (2008) *Árvores e Arbustos em Portugal*, Argumentum – Edições Estudos e Realizações. Lisboa. Pp 320
- Nobre, T. & Nunes, L. (2001) *Preliminary assessment of the térmite distribution in Portugal*. Silva Lusitana 9(2) pp 217-224
- Oliveira, A.C.; Fabião, A; Gonçalves, A.C; Correia, A.V. (2001) *O carvalho-cerquinho em Portugal*. ISA Press. Lisboa
- Oliveira, J.T; Tomasello, M.; Silva, J.C (2005) *Resistência natural da madeira de sete espécies de eucalipto ao apodrecimento*. Revista Árvore, Viçosa-MG (29)6 pp 993-998
- Santos, J.A., Reimão, D., Carvalho, J., Santos, J. (2005) *Madeira*. In *O Carvalho Negral*. Ed. J. Carvalho, UTAD, Vila Real
- Sobral, S.M (1996) *Estudos de crescimento e produção em parcelas permanentes de Carvalho português (Quercus faginea Lam)*. Relatório do trabalho de fim de curso em Engenharia florestal. Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa
- Spiecker, H. (2002) *Tree rings and forest management in Europe*. Dendrochronologia (20)1-2 pp 191-202
- Taylor, A.M; Gartner, B.L; Morrell, J.J; Tsunoda, K (2006) *Effects of heartwood extractive fractions of Thuja plicata and Chamaecyparis nootkatensis on wood degradation by termites or fungi*. J. Wood Sci. (52) pp 147-153

Trevisan, H; Nadai, J; Lunz, A.M; Carvalho, A.G (2003) *Ocorrência de térmitas subterrâneas (Isoptera: Rhinotermitidae e Termitidae) e durabilidade natural da madeira de 5 essências florestais*. Ciência Florestal, Santa Maria (13)2 pp 153-158

Tsoumis, G. (1991) *Science and Technology of wood. Structure, Properties, Utilization*. Van Nostrand Reinhold. Nova Iorque

Vignote Peña, S. & Jiménez Peris, F.J. (2000) *Tecnología de la Madera*. 2ª Edición, Ministerio de Agricultura, Pesca Y Alimentación. Mundi-Prensa. Madrid

Wang, S.Y & Wang, H.L. (1999) *Effects of moisture content and specific gravity on static bending properties and hardness of six wood species*. J. Wood Science 45 pp 127-133

Zobel, B. J. & Buijtenen, J.P. van (1986) *Wood variation – its causes and control*. Springer – Verlag pp. 363

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Quercus>, 20 de Julho de 2009

ANEXOS

Anexo 1. Comparação dos módulos de elasticidade determinados por flexão estática (E_f) e por compressão paralela às fibras (E_c) para a madeira de *Quercus faginea* de duas proveniências e com provetes retirados em duas posições radiais.

	Distância à medula	Código do provete	Massa volúmica	Teor de água (%)	E_f (N/mm ²)	E_c (N/mm ²)
Cortiços	90%	1.2.3	783	14.3	5247	5346
		1.2.5	687	13.9	5243	4487
		1.5.1	777	13.8	6851	5400
		2.2.3	934	14.4	9557	10553
		2.2.4	803	14.7	10044	9206
		2.5.2	1030	13.2	9641	8823
		3.2.2	779	14.6	9868	3165
		3.2.4	788	14.3	10097	12338
		3.5.1	856	14.0	7653	2528
	10%	1.2.3 (3)	1035	13.6	**	6000
		1.2.3 (4)	988	13.7		10962
		1.2.3 (5)	1014	13.6		13317
		1.5.2	737	14.1	7168	6356
		2.2.3	1021	13.9	10128	9864
		2.5.2	961	14.9	6937	8285
		3.2.2	910	14.8	8848	5851
		3.5.1	809	13.9	8026	5440
Gralhós	90%	4.2.1	752	14.1	8549	*
		4.2.2	772	14.2	8156	
		5.5.2	777	13.9	7679	6789
		6.2.1	787	14.5	8122	5042
		6.5.2	878	13.9	8631	12910
		7.2.1	792	13.6	7003	6952
		7.2.2	787	14.3	8052	7566
		7.5.1	753	13.8	7367	5276
		8.2.1	851	14.2	7591	9898
		9.2.1	895	14.2	9268	8250
		9.5.1	776	14.8	8318	8354
		10.2.2	972	13.9	7436	*
		10.5.1	777	13.7	7866	6256
	10%	4.2.2	936	14.4	10533	7668
		5.2.2	876	14.6	9802	7522
		5.5.1	885	14.3	8782	10447
		6.5.2	905	14.5	7651	5866
		7.2.2	1018	13.8	6294	7678
		7.5.1	804	14.5	7025	6011
		8.2.2	1050	14.5	8487	9150
		9.2.2	866	14.1	8475	7113
		9.5.1	798	14.2	6809	4547
		10.2.1	1111	13.9	9969	4525
		10.2.2	1008	13.8	9494	*
		10.5.2	762	14.1	7272	5550

Anexo 2. Comparação das tensões de ruptura determinados por flexão estática (σ_f) e por compressão paralela às fibras (σ_c) para a madeira de *Quercus faginea* de duas proveniências e com provetes retirados em duas posições radiais.

	Distância à medula	Código do provete	Massa volúmica (kg/m^3)	σ_f (N/mm^2)	σ_c (N/mm^2)
Cortiços	90%	1.2.3	783	67	41
		1.2.5	687	78	35
		1.5.1	777	82	40
		2.2.3	934	110	64
		2.2.4	803	118	48
		2.5.2	1030	103	63
		3.2.2	779	122	30
		3.2.4	788	83	49
		3.5.1	856	74	37
	10%	1.2.3 (3)	1035	**	50
		1.2.3 (4)	988		47
		1.2.3 (5)	1014		56
		1.5.2	737	90	33
		2.2.3	1021	123	75
		2.5.2	961	76	48
		3.2.2	910	123	40
		3.5.1	809	73	49
Gralhós	90%	4.2.1	752	106	*
		4.2.2	772	86	
		5.5.2	777	99	41
		6.2.1	787	90	43
		6.5.2	878	89	54
		7.2.1	792	87	39
		7.2.2	787	101	40
		7.5.1	753	93	42
		8.2.1	851	92	47
		9.2.1	895	131	56
		9.5.1	776	91	47
		10.2.2	972	95	*
		10.5.1	777	100	45
	10%	4.2.2	936	118	60
		5.2.2	876	112	58
		5.5.1	885	135	52
		6.5.2	905	105	42
		7.2.1	930	*	66
		7.2.2	1018	110	55
		7.5.1	804	86	43
		8.2.2	1050	127	35
		9.2.2	866	126	52
		9.5.1	798	53	51
		10.2.1	1111	121	45
		10.2.2	1008	119	*
		10.5.2	762	84	41

Nota:

*Provetes com dano mecânico e que não foram utilizados no ensaio à compressão.

** Provetes obtidos de uma peça não ensaiada à flexão por apresentar defeitos.

Anexo 3. Dureza do cerne determinada com uma esfera de com 11 mm diâmetro e uma esfera com 10 mm de diâmetro.

	Código dos provetes	Teor de água (%)	Dureza (N/mm ²)		Dureza (N/mm ²)	
			Ø 11 mm		Ø 10 mm	
			1ª Leitura	2ª Leitura	1ª Leitura	2ª Leitura
CERNE	7.2.1 (1)	13.8	85.6	75.4	61.2	61.8
	5.5.2	10.8	138.3	93.1	67.4	96.1
	3.5.3	14.1	100.6	78.8	66.2	71.2
	1.2.5 (2)	13.4	90.8	72.6	43.7	54.9
	1.5.2 (2)	13.8	85.6	77.5	58.1	62.4
	1.2.5 (3)	13.4	86.7	77.9	48.7	47.4
	9.5.2 (1)	12.1	112.5	86.6	68.7	77.4
	4.2.1	11.1	125.4	95.2	86.1	94.3
	2.2.3 (2)	9.9	175.4	111.0	134.8	118.6
	3.2.1	13.0	108.3	90.2	71.8	73.0
	2.2.3 (1)	11.5	177.5	104.3	121.1	116.1
	6.2.1	11.9	118.7	92.5	84.9	68.7
	1.5.2	13.2	96.0	80.9	57.4	69.9

Anexo 4. Dureza do borne determinada com uma esfera de com 11 mm diâmetro e uma esfera com 10 mm de diâmetro.

	Código dos provetes	Teor de água (%)	Dureza (N/mm ²)		Dureza (N/mm ²)	
			Ø 11		Ø 10	
			1ª Leitura	2ª Leitura	1ª Leitura	2ª Leitura
BORNE	7.5 d	13.4	83.1	83.6	49.9	46.2
	7.2.2 (2)	11.7	111.4	134.1	86.1	98.0
	1.2.1 (3)	13.7	82.5	84.1	59.3	61.2
	1.5.1	13.6	85.6	86.2	57.4	58.1
	1.2.4 (2)	14.0	87.7	82.5	59.9	62.4
	7.5c (1)	13.7	89.8	82.5	63.7	63.0
	7.2.2 (1)	13.2	96.0	85.6	80.5	59.9
	7.5 c	13.5	84.6	114.5	58.7	63.7
	1.2.1 (2)	13.8	85.6	76.3	54.9	65.5
	1.2.4 (1)	13.1	98.5	105.2	62.4	66.2
	6.2.2	11.5	82.5	90.8	63.7	65.5
	3.5.2 (1)	13.5	105.2	103.7	79.3	78.6
	1.2.1 (1)	13.5	77.4	85.6	53.7	52.4
	1.2.2 (1)	13.5	88.7	89.8	52.4	63.7
	3.5.2 (2)	12.4	105.2	91.8	83.6	82.4
	8.5.2	11.2	123.8	138.3	98.6	103.0

Anexo 5. Dureza determinada para o borne e para o cerne em provetes com 25 mm de espessura.

	Código dos Provetes	Dureza (N/mm2)	
		1ª Leitura	2ª Leitura
BORNE	7.5 d	35.50	40.23
	7.2.2 (2)	46.43	40.15
	1.2.1 (3)	46.04	59.40
	1.5.1	43.04	53.43
	1.2.4 (2)	33.45	43.77
	7.5c (1)	52.83	46.93
	7.2.2 (1)	41.73	36.06
	7.5 c	49.87	46.73
	1.2.1 (2)	51.10	55.28
	1.2.4 (1)	41.73	46.73
	6.2.2	44.69	46.53
	3.5.2 (1)	48.16	47.24
	1.2.1 (1)	58.85	47.95
	1.2.2 (1)	34.69	41.56
	3.5.2 (2)	48.16	50.87
	8.5.2	41.22	70.63

	Código dos Provetes	Dureza (N/mm2)	
		1ª Leitura	2ª Leitura
CERNE	7.2.1 (1)	43.58	40.56
	5.5.2	49.01	60.11
	3.5.3	43.04	46.73
	1.2.5 (2)	45.07	40.15
	1.5.2 (2)	40.15	37.95
	1.2.5 (3)	44.88	44.51
	9.5.2 (1)	55.03	53.67
	4.2.1	54.04	48.79
	2.2.3 (2)	52.72	72.45
	3.2.1	40.89	70.10
	2.2.3 (1)	52.83	52.72
	6.2.1	48.69	61.26
	1.5.2	65.55	37.80

Anexo 6. Dureza determinada em provetes compostos por lâminas de madeira de carvalho (3, 2 e 5 mm de espessura) e madeira de espruce.

	Código dos Provetes	Dureza (N/mm2)		
		1ª Leitura	2ª Leitura	3ª Leitura
3mm	1.2.2 A	39.3	35.0	43.86
	1.2.2 B	33.7	33.5	42.78
	1.2.5 A	35.4	36.1	45.84
	1.2.5 B	44.3	31.8	44.51
	8.5.1 A	34.6	45.5	46.04
	8.5.1 B	34.2	53.2	57.36
	8.5.1 C	43.0	38.3	49.44
	9.5.2	38.6	34.3	44.23
	10.2.1 A	55.5	44.3	47.95
	10.2.1 B	48.2	31.7	44.88

	Código dos Provetes	Dureza (N/mm2)		
		1ª Leitura	2ª Leitura	3ª Leitura
2 mm	1.2.3 A	38.11	37.58	34.69
	3.2.3 A	44.14	43.31	46.33
	3.5.3 A	47.34	37.95	37.80
	3.5.3 B	34.56	40.06	35.78
	3.2.1 A	30.74	40.15	37.80
	6.2.2 A	44.04	40.06	40.72
	6.2.2 B	37.95	40.56	36.92
	6.2.2 C	43.86	43.58	40.64
	6.2.2 D	32.82	37.36	36.56
	7.2.1 A	36.99	34.23	34.16

	Código dos Provetes	Dureza (N/mm ²)		
		1ª Leitura	2ª Leitura	3ª Leitura
5mm	1.1.2	34.6	37.9	54.28
	1.2.2 C	56.4	48.6	59.26
	2.2.3 A	42.4	57.1	61.26
	2.2.3 B	72.8	43.0	68.19
	2.2.3 C	41.0	39.8	59.12
	5.5.1	62.4	57.8	57.36
	8.2.2 A	44.0	43.3	45.75
	8.2.2 B	37.7	45.8	53.80
	8.5.1 D	61.0	46.2	69.75
	10.2.1 C	55.8	32.8	41.39

Anexo 7. Valores de tensão unitária de ruptura por fendimento

	Distância à medula	Código do provete	Massa volúmica	Teor de água (%)	F (N/mm)
Cortiços	90%	1.2.5 M90	0.774	10.81	29
		2.2.3 M90	0.761	11.35	36
		2.2.4 M90	0.924	11.75	36
		3.2.2 M90	0.801	11.40	33
		3.2.4 M90	0.817	11.30	22
		3.5.1 M90	0.837	11.36	30
	10%	1.2.3 M10	0.996	11.48	51
		1.5.2 M10	0.744	11.17	32
		2.5.2 M10	1.013	11.91	30
		3.2.2 M10	0.927	12.12	40
		3.5.1 M10	0.788	11.10	33
Gralhós	90%	4.2.1 M90	0.801	11.47	27
		4.2.2 M90	0.728	11.39	28
		5.5.2 M90	0.960	11.38	34
		6.2.1 M90	0.825	11.82	35
		7.2.1 M90	0.745	10.66	25
		7.2.2 M90	0.773	10.77	31
		7.5.1 M90	0.870	11.02	31
		8.2.1 M90	0.875	11.34	40
		9.2.1 M90	0.876	11.70	35
		9.5.1 M90	0.769	11.30	29
		10.5.1	0.818	11.64	36
	10%	5.2.2 M10	0.914	12.07	34
		5.5.1 M10	0.917	11.90	33
		6.5.2 M10	0.875	11.89	34
		7.5.1 M10	0.959	11.67	28
		8.2.2 M10	1.017	12.00	43
		9.2.2 M10	0.913	11.84	36
		9.5.1 M10	0.836	11.76	34

Anexo 8. Output referente da análise de regressão da Figura 19

Descriptive Statistics

	Mean	Std. Deviation	N
MOE_flexao	8203.56	1322.739	39
Massa_volumica	858.03	102.694	39

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R	Std. Error of
1	.422 ^a	.178	.156	1215.243

a. Predictors: (Constant), Massa_volumica

b. Dependent Variable: MOE_flexao

ANOVA^b

Model		Sum of	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1.184E7	1	1.184E7	8.020	.007 ^a
	Residual	5.464E7	37	1476814.477		
	Total	6.649E7	38			

a. Predictors: (Constant), Massa_volumica

b. Dependent Variable: MOE_flexao

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized		
		B	Std. Error	Beta	t	Sig.
1	(Constant)	3538.962	1658.578		2.134	.040
	Massa_volumica	5.436	1.920	.422	2.832	.007

a. Dependent Variable: MOE_flexao

Coefficients^a

Model		95.0% Confidence Interval for B	
		Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	178.364	6899.559
	Massa_volumica	1.547	9.326

Anexo 9. Output referente da análise de regressão da Figura 20

Descriptive Statistics

	Mean	Std. Deviation	N
MOE	7402.39	2592.868	38
Massa_volumica	871.71	106.387	38

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R	Std. Error of the
1	.361 ^a	.130	.106	2451.145

a. Predictors: (Constant), Massa_volumica

b. Dependent Variable: MOE

ANOVA^b

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	3.246E7	1	3.246E7	5.402	.026 ^a
	Residual	2.163E8	36	6008111.627		
	Total	2.487E8	37			

a. Predictors: (Constant), Massa_volumica

b. Dependent Variable: MOE

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized		
		B	Std. Error	Beta	t	Sig.
1	(Constant)	-271.955	3325.662		-.082	.935
	Massa_volumica	8.804	3.788	.361	2.324	.026

a. Dependent Variable: MOE

Coefficients^a

Model		95.0% Confidence Interval for B	
		Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	-7016.710	6472.801
	Massa_volumica	1.122	16.486

a. Dependent Variable: MOE

Anexo 10. Output referente da análise de regressão da Figura 21

Descriptive Statistics

	Mean	Std. Deviation	N
MOR	47.18	9.386	38
Massa_volumica	871.71	106.387	38

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R	Std. Error of the
1	.520 ^a	.270	.250	8.129

a. Predictors: (Constant), Massa_volumica

b. Dependent Variable: MOR

ANOVA^b

Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1 Regression	880.562	1	880.562	13.324	.001 ^a
Residual	2379.149	36	66.087		
Total	3259.711	37			

a. Predictors: (Constant), Massa_volumica

b. Dependent Variable: MOR

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized		
		B	Std. Error	Beta	t	Sig.
1	(Constant)	7.212	11.030		.654	.517
	Massa_volumica	.046	.013	.520	3.650	.001

a. Dependent Variable: MOR

Coefficients^a

Model		95.0% Confidence Interval for B	
		Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	-15.158	29.581
	Massa_volumica	.020	.071

a. Dependent Variable: MOR

Anexo 11. Output referente da análise de regressão da Figura 22

Descriptive Statistics

	Mean	Std. Deviation	N
MOR_flexao	98.6000	20.13391	40
Massa_volumica	859.83	102.006	40

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R	Std. Error of the
1	.465 ^a	.216	.196	18.05791

a. Predictors: (Constant), Massa_volumica

b. Dependent Variable: MOR_flexao

ANOVA^b

Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1 Regression	3418.246	1	3418.246	10.483	.003 ^a
Residual	12391.354	38	326.088		
Total	15809.600	39			

a. Predictors: (Constant), Massa_volumica

b. Dependent Variable: MOR_flexao

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized		
		B	Std. Error	Beta	t	Sig.
1	(Constant)	19.686	24.540		.802	.427
	Massa_volumica	.092	.028	.465	3.238	.003

a. Dependent Variable: MOR_flexao

Coefficients^a

Model		95.0% Confidence Interval for B	
		Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	-29.993	69.365
	Massa_volumic	.034	.149

a. Dependent Variable: MOR_flexao

Anexo 12. Output referente da análise de regressão da Figura 23

Descriptive Statistics

	Mean	Std. Deviation	N
MOR	47.18	9.386	38
MOE	7402.39	2592.868	38

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R	Std. Error of the
1	.559 ^a	.313	.294	7.888

a. Predictors: (Constant), MOE

b. Dependent Variable: MOR

ANOVA^b

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1019.795	1	1019.795	16.390	.000 ^a
	Residual	2239.916	36	62.220		
	Total	3259.711	37			

a. Predictors: (Constant), MOE

b. Dependent Variable: MOR

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized		
		B	Std. Error	Beta	t	Sig.
1	(Constant)	32.196	3.917		8.219	.000
	MOE	.002	.001	.559	4.048	.000

a. Dependent Variable: MOR

Coefficients^a

Model		95.0% Confidence Interval for B	
		Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	24.252	40.140
	MOE	.001	.003

a. Dependent Variable: MOR

Anexo 13. Output referente da análise de regressão da Figura 24

Descriptive Statistics

	Mean	Std. Deviation	N
MOR_flexao	99.4359	19.68140	39
MOE_flexao	8203.56	1322.739	39

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R	Std. Error of the
1	.663 ^a	.439	.424	14.93782

a. Predictors: (Constant), MOE_flexao

b. Dependent Variable: MOR_flexao

ANOVA^b

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	6463.469	1	6463.469	28.966	.000 ^a
	Residual	8256.121	37	223.138		
	Total	14719.590	38			

a. Predictors: (Constant), MOE_flexao

b. Dependent Variable: MOR_flexao

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized		
		B	Std. Error	Beta	t	Sig.
1	(Constant)	18.551	15.218		1.219	.231
	MOE_flexao	.010	.002	.663	5.382	.000

a. Dependent Variable: MOR_flexao

Coefficients^a

Model		95.0% Confidence Interval for B	
		Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	-12.284	49.385
	MOE_flexao	.006	.014

a. Dependent Variable: MOR_flexao

Anexo 14. Output referente da análise de regressão da Figura 26

Descriptive Statistics

	Mean	Std. Deviation	N
Valor_fendimento	32.64	4.604	28
Massa_volúmica_	852.04	81.579	28

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R	Std. Error of the
1	.453 ^a	.206	.175	4.182

a. Predictors: (Constant), Massa_volúmica_

b. Dependent Variable: Valor_fendimento

ANOVA^b

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	117.726	1	117.726	6.732	.015 ^a
	Residual	454.702	26	17.489		
	Total	572.429	27			

a. Predictors: (Constant), Massa_volúmica_

b. Dependent Variable: Valor_fendimento

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized		
		B	Std. Error	Beta	t	Sig.
1	(Constant)	10.834	8.443		1.283	.211
	Massa_volúmica_	.026	.010	.453	2.595	.015

a. Dependent Variable: Valor_fendimento

Coefficients^a

Model		95.0% Confidence Interval for B	
		Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	-6.520	28.188
	Massa_volúmica_	.005	.046

a. Dependent Variable: Valor_fendimento

Anexo 15. Teste à normalidade da massa volúmica

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test		
		Massa volúmica
Normal Parameters ^{a,b}	N	43
	Mean	870.9302
	Std. Deviation	106.63855
Most Extreme Differences	Absolute	.184
	Positive	.184
	Negative	-.087
	Kolmogorov-Smirnov Z	1.209
Asymp. Sig. (2-tailed)		.107

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

Significância > 0,05

Logo, **Distribuição NORMAL**

Anexo 16. Teste à normalidade dos valores de Força unitária de fendimento

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test		
		Força unitária de fendimento
Normal Parameters ^{a,b}	N	28
	Mean	32.64
	Std. Deviation	4.604
Most Extreme Differences	Absolute	.126
	Positive	.126
	Negative	-.102
	Kolmogorov-Smirnov Z	.666
Asymp. Sig. (2-tailed)		.767

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

Significância > 0,05

Logo, **Distribuição NORMAL**

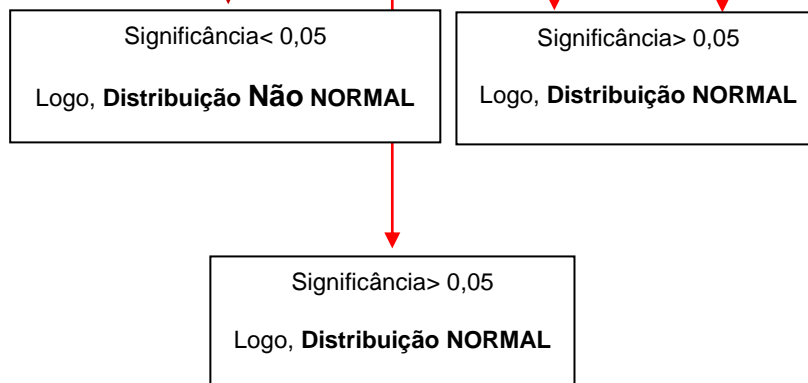
Anexo 17. Teste à normalidade dos valores obtidos para a caracterização da dureza de provetes de borne e cerne.

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

		HD borne (10mm)	HD borne (11mm)	HD cerne (10mm)	HD cerne (11mm)
Normal Parameters ^{a,b}	N	32	32	26	26
	Mean	67.309	94.444	76.227	101.438
	Std. Deviation	14.6065	15.7217	24.1016	27.3671
Most Extreme Differences	Absolute	.249	.223	.207	.194
	Positive	.249	.223	.207	.194
	Negative	-.091	-.161	-.105	-.146
	Kolmogorov-Smirnov Z	1.409	1.262	1.056	.990
	Asymp. Sig. (2-tailed)	.038	.083	.215	.281

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.



Anexo 18. Teste à normalidade dos resultados obtidos para a dureza de Brinell (HB) em provetes de cerne e de borne com 25 mm de espessura.

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

		HB (25mm)	HB (25mm) Borne
Normal Parameters ^{a, b}	N	26	32
	Mean	50.088	46.593
	Std. Deviation	9.5951	7.7590
Most Extreme Differences	Absolute	.122	.139
	Positive	.122	.139
	Negative	-.100	-.078
	Kolmogorov-Smirnov Z	.624	.785
	Asymp. Sig. (2-tailed)	.830	.569

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

Significância > 0,05
Logo, **Distribuição NORMAL**

Significância > 0,05
Logo, **Distribuição NORMAL**

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

		HB_2mm	HB_3mm	HB_5mm
Normal Parameters ^{a,b}	N	30	30	30
	Mean	38.893	41.907	51.022
	Std. Deviation	4.0503	7.0455	10.8002
Most Extreme Differences	Absolute	.143	.130	.138
	Positive	.143	.130	.138
	Negative	-.096	-.116	-.104
	Kolmogorov-Smirnov Z	.785	.712	.755
Asymp. Sig. (2-tailed)		.569	.691	.619

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

Significância > 0,05
Logo, **Distribuição NORMAL**

Significância > 0,05
Logo, **Distribuição NORMAL**